

Olli Valta

Tahtigeneraattorin magnetointikoneen sähköisten parametrien  
määrittäminen mallintamalla ja mittaamalla

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa  
varten Espoossa 24.5.2013.

**Työn valvoja:**

Prof. Antero Arkkio

**Työn ohjaaja:**

DI Jan Westerlund

Tekijä:	Olli Valta		
Työn nimi:	Tahtigeneraattorin magnetointikoneen sähköisten parametrien määrittäminen mallintamalla ja mittaamalla		
Päivämäärä:	24.5.2013	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 63
Sähkötekniikan laitos			
Professuuri: Sähkömekaniikka			Koodi: S-17
Valvoja: Prof. Antero Arkkio			
Ohjaaja: DI Jan Westerlund, ABB Oy			
<p>Tahtigeneraattorin magnetointikoneen sähköisten parametrien tarkka määrittäminen on tullut tarpeelliseksi Euroopassa jatkuvasti tiukentuvien verkkostandardien johdosta. Tähän saakka parametrit on tyypillisesti määritetty ABB Oy:ssä käyttäen analyyttistä laskentaohjelmaa. Tässä työssä magnetointikoneen parametreja pyritään määrittämään tarkemmin sekä FEM simulaatioilla että käytännön mittauksilla. Lisäksi tarkkaillaan magnetointikoneen kestromagneettinavan vaikutuksia saatuihin parametreihin.</p> <p>Simulaatioita varten magnetointikoneen poikkileikkaukselle rakennetaan geometria, jonka avulla mallinnetaan tahtikoneiden parametrien määrittämisessä suoritettavia kokeita käyttäen elementtimenetelmään perustuvaa FCSMEK-ohjelmistoa. Käytännön mittauksia suunniteltaessa valittiin koelaitteeksi yleisesti ABB:llä käytetty magnetointikone, jonka sähköisille parametreille oli valmis analyyttinen malli. Tarvittavien kokeiden suorittamiseksi magnetointikoneen kolmivaihekkäisyys piti saada kytkettyä oikosulkuun. Tätä varten koneeseen suunniteltiin tyristorisilta, joka toimi roottorin oikosulkukytkenä. Roottoriin piti lisäksi sovittaa tavallisesta magnetointikoneesta poiketen anturit roottorin virtamittauksille. Magnetointikoneiden mittauksissa ongelmana on niiden hankala sijainti generaattorien sisällä. Ratkaisimme ongelman käyttämällä mittauksissa erillistä pyörityslaitetta. Kone tilattiin ABB Oy:n Pitäjänmäen tehtaalle, jossa se valmisteltiin koestusta varten. Koneen asennus ja mittaukset suoritettiin ABB:n ammattilaisten avustuksella Pitäjänmäen äänilaboratoriossa.</p> <p>Parametrien määrittäminen suoritetaan simulaatio- ja mittausdatasta IEC 60034-4 standardin mukaisesti. Lisäksi osa parametreista määritetään sysäysoikosulkukokeen vaihevirralle tehdyllä käyräsovituksella. Saatuja simulaatio- ja mittaustuloksia verrataan toisiinsa, sekä analyyttisen laskentaohjelman tuloksiin.</p> <p>Mittaus- ja simulaatiotulokset vastaavat hyvin toisiaan, sekä analyyttisiä tuloksia reaktanssien osalta. Analyyttisesti määritetyt aikavakiot osoittautuvat huomattavasti simulaatio- ja mittaustuloksia pienemmiksi. Kestomagneettinavan vaikutukset parametreihin jäävät pieniksi. Työn tulosten pohjalta esitetään käytetyn analyyttisen ohjelmiston aikavakioiden laskennan tarkistamista. Simulaatio- ja mittaustulosten yhteensopivuus puhuisi myös elementtimenetelmän käyttöön siirtymisen puolesta magnetointikoneen sähköisten parametrien määrittämisessä.</p>			
Avainsanat: magnetointikone, elementtimenetelmä, reaktanssi, aikavakio, FCSMEK, mittaus, IEC 60034-4, käyräsovitus			

Author:	Olli Valta		
Title:	Identifying Electrical Parameters for Excitation Machine of a Synchronous Generator by Simulation and Measurements		
Date:	24.5.2013	Language: Finnish	Number of pages: 63
Department of Electrical Engineering			
Professorship: Electromechanics			Code: S-17
Supervisor: Prof. Antero Arkkio			
Advisor: M.Sc. (Tech.) Jan Westerlund, ABB Oy			
<p>Determining exact values for excitation machine parameters has become increasingly important due to continuously straining European grid standards. Thus far at ABB these parameters have been determined with analytical calculation software. In this work, excitation machine parameters are determined by finite element method simulation and measurements. Additionally effect of excitation machines permanent magnet pole on parameters is observed.</p> <p>Cross-sectional geometry of excitation machine is constructed for finite element method simulation program FCSMEK. FCSMEK is then used to simulate the tests needed to identify the electrical parameters for the excitation machine.</p> <p>The machine for the measurements was chosen as one of the standard models used at ABB. In order to carry out the chosen tests the excitation machines rotor had to have the ability for controlled switch between no-load and short-circuit states. To fulfill this requirement a thyristor bridge was designed for the rotor. Also current measurement probes were installed to rotor phases. Location of excitation machine in the generator makes it problematic to measure successfully. To work around this problem we installed the excitation machine's rotor to a special rotating platform. The excitation machine was ordered from subcontractors to ABB Pitäjänmäki where it was prepared for the tests. The tests were performed at ABB's anechoic chamber with the help of ABB employees.</p> <p>Electrical parameters are extracted from simulation and measurement data by IEC 60034-4 standards' guidelines. Additionally some of the parameters are solved from sudden short-circuit test data with curve fitting method. The results from simulations and measurements are compared to each other and to the results of the analytical software.</p> <p>It is found, that the simulation and measurement results correlate well with each other. The analytical reactance values are also in line with previous. The analytical time constants, however, are much smaller than the measured and simulated values. Permanent magnet pole's effect on the parameters is found to be minor.</p> <p>From the results of this work it is presented that the time constant calculation of the analytical software is inspected. Additionally calculating the electrical parameters using FEM simulation instead of analytical software is a possible option.</p>			
Keywords: excitation machine, finite element method, reactance, time constant, FCSMEK, measurements, IEC 60030-4, curve fitting			

## Esipuhe

Haluan kiittää Professori Antero Arkkiota ja ohjaajaani Jan Westerlundia työn aikana saamistani arvokkaista ohjeista.

Lisäksi työni kanssa auttoi suuri määrä ABB:n työntekijöitä niin toimistolla kuin koekentän puolella. Heidän apunsa oli työn kannalta korvaamatonta. Erityisesti haluan kiittää Jussi Saarta magnetointikoneen asennus- ja kytkentäosien suunnittelusta. Suurkiitos myös Jori Keitamolle hänen avustaan magnetointikoneen mittausten parissa.

Lopuksi vielä kiitos vanhemmilleni, veljelleni sekä avopuolisolleni Eevalle tuesta ja kannustuksesta.

Helsinki, 24.5.2013

Olli Valta

## Sisällysluettelo

Esipuhe.....	4
Symbolit, lyhenteet ja määritelmät .....	7
1 Johdanto .....	9
1.1 Taustaa työlle .....	9
1.2 Työn tavoite .....	9
1.3 Aiheen rajausta.....	10
2 Tahtigeneraattori ja magnetointikone .....	11
2.1 Tahtigeneraattori .....	11
2.2 Magnetointikoneen rakenne ja toiminta .....	12
3 Mallinnus .....	14
3.1 Finite element method (FEM) .....	14
3.2 Käytetyt ohjelmistot.....	15
3.2.1 FCSMEK .....	15
3.2.2 FEMM (Finite Element Method Magnetics) .....	15
3.2.3 Adept.....	15
3.2.4 THW32 .....	15
3.3 Simulaatiomallin rakennus.....	16
3.4 Mallinnettavat kokeet.....	19
3.4.1 Magnetointikentän vaimeneminen (Field decay test) .....	19
3.4.2 Jännitteen herääminen (Voltage recovery test).....	19
3.4.3 Sysäysoikosulkukoe (Sudden short circuit test) .....	20
3.4.4 Kokeiden mallinnus Adept:illa ja FCSMEK:illä .....	20
4 Parametrien määrittäminen mallinnetusta datasta.....	22
4.1 Sysäysoikosulkukoe .....	22
4.1.1 IEC 60034-4 .....	22
4.1.2 Käyräsovitus.....	25
4.2 Magnetointikentän vaimeneminen .....	28
4.3 Jännitteen herääminen .....	30
4.4 Virhetarkastelu.....	32
4.4.1 Sysäysoikosulun käyräsovituksessa syntyvä virhe.....	33
4.4.2 Virhelähteet IEC standardin mukaisessa määrittäyksessä.....	35
5 Magnetointikoneen mittaukset.....	36
5.1 Magnetointikoneen hankinta ja asennus .....	36
5.2 Mitattava laitteisto, mittalaitteet ja pohjapiirustus .....	37

5.3	Valmistelevat kokeet.....	40
5.3.1	Koneen ulkoisen kunnon ja asennuksen tarkastaminen .....	40
5.3.2	Ilmavälin tarkastus .....	40
5.3.3	Eristysvastusmittaus .....	41
5.3.4	Kylmävastusmittaukset.....	41
5.3.5	Tyristorisillan tyristorien tarkastaminen .....	41
5.3.6	Laakeriajo .....	42
5.3.7	Tyhjäkäynti- ja oikosulkupiste.....	42
5.4	Parametrien määrittämiseksi suoritettut kokeet.....	42
5.4.1	Tyhjäkäynti- ja oikosulkukäyrät .....	42
5.4.2	Tyhjäkäyntijännitteen vaimeneminen .....	44
5.4.3	Oikosulkuvirran vaimeneminen.....	44
5.4.4	Sysäysoikosulkukoe.....	44
5.5	Virhetarkastelu.....	48
5.5.1	Virhelähteet IEC standardin mukaisissa määrityksissä.....	48
5.5.2	Sysäysoikosulun käyränsovituksessa syntyvät virheet .....	49
6	Tulosten tarkastelu ja hyödyntäminen.....	51
6.1	Parametrien ja mitattujen käyrämuotojen tarkastelu .....	51
6.2	Kestomagneettinavan vaikutus parametreihin .....	56
6.3	Tulosten hyödyntäminen .....	58
7	Johtopäätöksiä ja ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi.....	59
	Viitteet .....	61
	Liite A .....	63

## Symbolit, lyhenteet ja määritelmät

### Symbolit

$f$	taajuus
$f_s$	näytteenottotaajuus
$n$	pyörimisnopeus, kierroksia minuutissa
$N$	käämin kierrosluku
$I_{ac}$	staattorivirtojen verhokäyrien keskiarvovektori
$i_{alaverho}$	staattorivirtojen alaverhokäyrävektori
$i_{sa}$	staattorin vaihevirta
$i_{yläverho}$	staattorivirtojen yläverhokäyrävektori
$I_K$	oikosulkuvirta
$I_1$	staattorivirtojen verhokäyrien keskiarvo, josta vähennetty lopputilan virta
$I_\infty$	pysyvän tilan virta
$\hat{I}$	virran huippuarvo
$L_d$	d-akselin suuntainen itseinduktanssi
$L_{df}$	d-akselin ja magnetointikäämin keskinäisinduktanssi
$L_f$	magnetointikäämin itseinduktanssi
$p$	Napapariluku
$p'_1$	ekstrapolointisuoran funktion muuttuja, josta saadaan muutostilan virran alkuarvo
$p'_2$	ekstrapolointisuoran funktion muuttuja, josta saadaan suoran kulmakerroin ja muutostilan aikavakio
$p''_1$	ekstrapolointisuoran funktion muuttuja, josta saadaan alkutilan virran arvo
$p''_2$	ekstrapolointisuoran funktion muuttuja, josta saadaan suoran kulmakerroin ja alkutilan aikavakio
$R_f$	magnetointikäämin resistanssi
$U_N$	nimellisjännite
$\hat{u}_{s0}$	staattorin vaihejännitteen huippuarvo
$U_{verhokäyrä}$	staattorijännitteiden verhokäyrä
$U_0$	alkutilan jännite
$U_\infty$	pysyvän tilan jännite
$X_d$	d-akselin suuntainen pysyvän tilan reaktanssi
$X'_d$	d-akselin suuntainen muutostilan reaktanssi
$X''_d$	d-akselin suuntainen alkutilan reaktanssi
$X''_q$	q-akselin suuntainen alkutilan reaktanssi
$\Delta I'$	muutostilan virtaa kuvaava käyrä
$\Delta I''$	alkutilan virtaa kuvaava käyrä
$\Delta U$	jännitteen verhokäyrän ja pysyvän tilan jännitteen erotusvektori
$\Delta U'$	muutostilan jännitettä kuvaava käyrä
$\Delta U''$	alkutilan jännitettä kuvaava käyrä
$\varepsilon$	indusoitunut jännite
$\tau_a$	virran dc-komponentin aikavakio
$\tau'_d$	oikosulkuvirran muutostilan aikavakio
$\tau''_d$	oikosulkuvirran alkutilan aikavakio
$\tau'_{d0}$	tyhjäkäyntijännitteen muutostilan aikavakio
$\Phi_B$	käämin lävistävä magneettivuo

## Lyhenteet ja määritelmät

AC	vaihtovirta
AVR	jännitesäätäjä (Automatic Voltage Regulator)
DC	Tasavirta
FEM	elementtimenetelmä (Finite Element Method)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
lua – tiedostot	tiedostotyyppi, johon ohjelmoitu sähkökonegeometria tallennetaan
PM	permanent magnet, kestopagneetti
p. u.	per unit
rms	root mean square



# 1 Johdanto

## 1.1 Taustaa työlle

Sähkönjakeluun liittyviä verkkovaatimuksia kehitetään jatkuvasti. Yhä tarkentuvat asetukset verkkoon kytkettäville järjestelmille luovat vaatimuksia sähkökonevalmistajien tuotteille. Vastuu laitteiden verkkovaatimusten täyttämisestä lepää loppukäyttäjän harteilla, joten sähkökoneiden ostajien vaatimukset laitteiden toimintaa kohtaan ovat lisääntyneet.

Tahtigeneraattori on tavallinen sähköverkkoon kytkettävä komponentti ja tyypillinen ABB Oy:llä myytävä tuote. Yllä esitetyt seikat ovat luoneet tarvetta lisätutkimuksille tahtigeneraattorien sähköisestä toiminnasta. Tahtigeneraattorien magnetoinnissa käytetään nykyään usein magnetointikoneita, joka on yksi tahtigeneraattorin sähköiseen käyttäytymiseen vaikuttavista komponenteista.

Tahtikoneiden toimintaa staattisessa- ja muutostilassa kuvataan kaksiakselimalliin perustuvilla sähköisillä parametreilla. Magnetointikone on pieni tahtigeneraattori, jolle voidaan määrittää kaksiakselimallin mukaiset sähköiset parametrit. Tässä työssä käsiteltävät parametrit ovat koneen toiminnan eri tiloissa esiintyvät reaktanssit ja aikavakiot.

Tähän asti ABB:llä nämä parametrit ovat määritetty magnetointikoneelle analyyttisen laskentaohjelman avulla. ABB:llä tehtyjen magnetointijärjestelmien simulaatioiden perusteella on arveltu, että analyyttisellä ohjelmalla määritetyt parametrit, varsinkin aikavakiot, olisivat epätarkkoja. Kiristyvien verkkovaatimusten johdosta on magnetointikoneen sähköiseen toimintaan ryhdytty kiinnittämään yhä enemmän huomioita ja koneen toimintaa kuvaavien sähköisten parametrien laskumalleja halutaan kehittää.

## 1.2 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on määrittää magnetointikoneen sähköisiä parametreja elementtimenetelmään perustuvista simulaatiotuloksista. Tarkoituksena on selvittää, voidaanko elementtimenetelmään perustuvilla simulaatioilla saavuttaa analyyttistä mallia tarkempia arvoja magnetointikoneen parametreille. Lisäksi halutaan tutkia magnetointikoneen staattorin kestopagneettinavan vaikutuksia koneen sähköisiin parametreihin.

Simulaatiomallin hyvyyttä tarkastellaan vertaamalla simuloituja tuloksia mittaustuloksiin, jotka saadaan koestamalla magnetointikone jonka pohjalta simulaatiomalli rakennettiin. Simulaatioista ja mittauksista saatuja parametreja verrataan analyyttisestä laskentaohjelmasta saatuihin tuloksiin ja pohditaan analyyttisen mallin tarkkuutta.

### 1.3 Aiheen raja

Työssä keskitytään sähköisten parametrien ratkaisuun simuloituista ja mitatuista tuloksista. Tulosten mielekkyyttä ja määrityksessä syntyviä mahdollisia virheitä analysoidaan. Lopuksi esitetään tuloksista saatavat hyödyt. Simulaatioissa käytettyjen ohjelmistojen sisäistä toimintaa ei tarkastella, eikä analyyttisen laskentaohjelman sähköisten parametrien ratkaisuun tutustuta. Parametrien selvittämiseksi tehdyt simulaatiot ja sähkökoneen koestukset valittiin oleellisimpien parametrien selvittämiseksi. Valintaan vaikutti kokeiden toteutettavuus sekä simulaatiomallilla että todellisilla mittauksilla. Kaikkia tahtikoneiden sähköisiä parametreja ei määritetty. Oleellista oli kyetä vertailemaan simulaatiomallin tulosten, sekä todelliselle koneelle tehtyjen mittausten yhteensopivuutta.

## 2 Tahtigeneraattori ja magnetointikone

### 2.1 Tahtigeneraattori

Tahtigeneraattori on nykyaikaisen sähköverkon toiminnan kannalta välttämätön komponentti. Lähes kaikki sähköenergia kehitetään nykyisin tahtigeneraattoreilla (Luomi et al, 2007). Tahtigeneraattorit tuottavat sekä ylläpitävät sähköverkon jännitteen ja taajuuden.

Tahtikoneen, kuten minkä tahansa muunkin pyörivän sähkökoneen, pääkomponentit ovat staattori ja roottori. Tahtikoneen toimiessa staattisessa tilassa, staattorin ja roottorin muodostamat magneettikentät pyörivät keskenään samalla nopeudella, eli tahdissa.

Staattori sisältää kolmivaiheisen käämityksen, joka on upotettu rautasydämen sisäpinnalla sijaitsevaan uritukseen. Tämä on tahtikoneen työköämitys. Staattorin rautasydän on valmistettu latomalla sähkölevystä. (Silander 2001) Staattorisydän on osa sähkökoneen magneettipiiriä ja sen päätehtävänä on johtaa sähkökoneessa kulkevaa magneettivuota.

Roottorilla sijaitsee tahtikoneen magnetointikäämitys, jota syötetään tasavirralla. Magnetointikäämityksen tehtävänä on luoda roottorille oma magneettikenttä, joka pysyy roottorin nähden muuttumattomana magnetointivirran pysyessä vakiona. Tahtikoneen roottori pyörii staattisessa tilassa nopeudella, jolla sen luoma magneettikenttä on tahdissa staattorin magneettikentän kanssa. Roottorin mekaaninen pyörimisnopeus voidaan määrittää yhtälöstä 1:

$$n = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{f}{p} \quad (1)$$

Missä  $n$  on pyörimisnopeus kierroksina sekunnissa,  $\Omega$  on kulmataajuus,  $f$  on sähköinen taajuus ja  $p$  on koneen napaparien määrä.

Tahtikoneissa käytetään pääasiassa kahta eri roottorirakennetta: avonapaista ja umpinapaista. Umpinapainen roottorirakenne on sylinterimäinen sähkölevystä ladottu tai massiiviteräksinen runko, jonka pintaan on uritettu paikat tasavirtakäämitykselle. Avonapainen roottori koostuu teräsrunkoon liitetyistä sähkölevysydämisistä navoista, joiden ympärille on sovitettu tasavirtakäämitys. Napoja on roottorilla aina parillinen määrä. Roottorin rautasydän yhdessä ilmavälin ja staattorin rautasydämen kanssa muodostavat koneen magneettipiirin. Magneettivuo kulkee roottorin pohjoisesta magneettinavasta ilmavälin yli staattorille, kulkee staattoriydintä pitkin roottorin etelänavan kohdalle, jossa se ylittää ilmavälin uudestaan muodostaen silmukkamaisen reitin. (Luomi et al, 2007)

Roottorin magnetointi voidaan toteuttaa usealla eri tavalla (Luomi et al, 2007):

1. Hiiliharjojen kautta. Magnetointivirta voidaan syöttää roottorikäämitykseen hiiliharjojen läpi, jotka laahaavat roottorin akselille kiinnitettyjä liukurenkaita.

2. Kestomagneeteilla, jotka asennetaan roottorirakenteen pinnalle tai sisään. Kestomagneetit korvaavat tyypillisesti roottorin magnetointikäämykset, jolloin ulkoista magnetointivirtaa ei tarvita.
3. Harjattomalla magnetoinnilla. Roottorin akselille asennetaan erillinen magnetointikone, jolla on staattorilla tasavirta- tai kolmivaihekäämitys ja roottorilla kolmivaihekäämitys sekä tasasuuntaussilta.

## 2.2 Magnetointikoneen rakenne ja toiminta

Tässä kappaleessa esitellään magnetointikonetta. Pääpaino on tasavirtamagnetoidulla magnetointikoneella (DC-magnetointikone), mutta myös kolmivaiheisella vaihtovirralla syötettyä magnetointikonetta (AC-magnetointikone) käsitellään vertailun vuoksi.

Pääkoneen staattorin rakenteesta poiketen, tasavirtakäämityksellä (DC) varustettujen magnetointikoneiden staattorin runko valmistetaan polttoleikatuista massiivirautarenkaista. Renkaat ovat hyvin pitkiä sähköpeltisiivuihin nähden ja koko staattorirunko muodostuu yhdestä tai muutamasta yhteen hitsatusta palasta riippuen halutusta koneen pituudesta. (Silander 2001)

Staattoripaketti voidaan valmistaa massiiviraudasta, koska DC-magnetointikäämyks ei aiheuta muuttuvaa vuota rautaytimeen kolmivaiheisen käämityksen (AC) tapaan. Ilmavälivuon korkeataajuiset harmoniset komponentit läpäisevät vain hieman staattorin napojen pintaa, eivätkä tällöin vaikuta juurikaan ytimen vuohon. Vakiovuo pitää staattorin pyörevirrat pienenä, eikä rautahäviöitä tarvitse rajoittaa latomalla staattoria sähkölevyistä. (Pyrhönen et al 2008)

Magnetointikäämyks on kierretty staattorinapojen ympärille niin, että ne ovat vierekkäisillä navoilla aina vastakkaisiin suuntiin. Käämien kierrosluvut ovat samat jokaisella navalla. Yksi navoista on kuitenkin korvattu kestomagneetilla. Kestomagneettinavalla on oma käämityksensä, joka on erillinen muusta staattorin käämityksestä. Kestomagneetti magnetoidaan tehtaalla tämän käämityksen avulla. (Silander 2001)

Kestomagneettinavan tehtävänä on luoda magnetointikoneeseen pieni remanenssivuoto, jolla pääkoneeseen saadaan aikaiseksi hieman jännitettä. Tällä jännitteellä syötetään jännitemuuntajien kautta koneen jännitteensäätäjää eli AVR:ää (Automatic Voltage Regulator), joka puolestaan syöttää virran magnetointikoneen staattorikäämykseen. Näin generaattori tarvitsee heräämiseen ainoastaan sitä pyörittävän voimanlähteen. AVR:n kautta pystytään säätämään koneen magnetointia halutulla tavalla.

Magnetointikoneen roottorin rautasydän on ladottu sähköpellistä meistetyistä levyistä. Roottorin ulkoreunalla on urat, joihin upotetaan kolmivaihekäämitys. Pyöriessään staattorin magneettikentässä indusoituu roottorin kolmivaihekäämityksiin jännite Faradayn induktiolain mukaan.

Roottoriin syntyvä kolmivaihejännite tasasuunnataan diodisillalla, joka on kiinnitetty roottorin kylkeen. Diodisillalta tuleva tasajännite syöttää pääkoneen roottorin magnetointikäämystä. (Niemelä 2005)

Diodisillassa kolmivaihejännitteen tasasuuntaus tapahtuu kuusipulssitasasuuntaajan läpi kuparikiskoihin, jotka toimivat tasajännitepiirin plus- ja miinuskiskoina. Tasajännitekiskojen välille tarvitaan suojapiiri, joka koostuu tavallisesti varistorista, vastuksesta ja kondensaattorista. Suojauksen tehtävänä on poistaa piiristä ylijännitepiikkejä. (Silander 2001)

Magnetointikone on pieni tahtigeneraattori, missä on kuitenkin rakenteellisia eroja tavanomaiseen tahtigeneraattoriin. Suurena erona ovat staattorin ja roottorin vaihtuneet roolit. Tavallisessa tahtigeneraattorissa kolmivaiheinen työkäämitys sijaitsee paikallaan olevassa staattorissa ja magnetointikäämitys pyörivässä avonapaisessa roottorissa. Magnetointikoneessa kolmivaiheinen työkäämitys on puolestaan roottorilla ja magnetointikäämitys avonapaisessa staattorissa. Magnetointikonetta voidaan ajatella käänteisenä tahtikoneena.

Tasavirralla syötettyjen magnetointikoneiden täytyy pyöriä pystyäkseen syöttämään jännitettä pääkoneen roottorille. Niitä käytetään pääasiassa generaattoreissa, joissa toimitaan jatkuvasti tasaisella pyörimisnopeudella. Joissain tapauksissa kuitenkin tarvitaan magnetointikone, joka pystyy syöttämään pääkoneen roottorille magnetointivirtaa myös roottorin ollessa pysähdyksissä. Tähän tarkoitukseen tarvitaan magnetointikone, jonka staattoria syötetään kolmivaiheisella AC-virralla.

Pääasiallinen ero DC- ja AC-magnetointikoneissa on niiden staattorin luomassa magneettikentässä. AC-koneen staattori muodostaa pyörivän magneettikentän, jolloin pääkoneen roottori pysyy magnetoituna myös pyörimisnopeuden ollessa nolla. Tämä on toivottavaa esimerkiksi moottorikäytöissä.

Tässä työssä keskitytään tutkimaan tasavirralla syötettyä magnetointikonetta ja erityisesti sen sähköisiä parametreja.

### 3 Mallinnus

Tässä luvussa käsitellään magnetointikoneen toiminnan mallintamista, sekä sen sähköisten parametrien määrittämistä tietokoneen avulla. Lisäksi esitellään käytetyt ohjelmistot, sekä käydään läpi mallin rakennus ja simuloimisprosessi.

#### 3.1 Finite element method (FEM)

Finite element method tai elementtimenetelmä on numeerinen menetelmä jota käytetään sähkökonelaskennassa monimutkaisten geometrioiden kenttäyhtälöiden ratkaisussa. Sähkökoneissa kenttäongelmat ovat kolmiulotteisia, mutta ne voidaan usein pelkistää kaksiulotteisiksi olettamalla kenttä symmetriseksi koneen akselisuunnassa. (Arkkio 1987)

Mallinnettavaksi alueeksi saadaan näin koneen poikkileikkaus. Aluetta voidaan edelleen pienentää kunnes löydetään pienin mahdollinen geometria. Pienin geometria on siivu koneen poikkileikkauksesta, jolla pystytään symmetrian nojalla kuvaamaan koko poikkileikkaus hukkaamatta tietoa kenttäratkaisusta.

Mallissa täytyy olla reunaehdot, jotka määrittävät kentän käyttäytymisen alueen reunoilla. Elementtimenetelmässä alueen reunat määritellään Dirichlet ja Neumann reunaehdoilla. Reunoilla, joissa potentiaali tunnetaan, käytetään Dirichlet reunaehto. Näitä reunoja ovat esimerkiksi staattoriselän ja ulkoilman väliset pinnat. Kenttäviivat eivät läpäise Dirichlet reunoja. Reunoille, joiden ylitse pätee symmetria, asetetaan tyypillisesti Neumannin reunaehto, joka asettaa kenttäviivat kulkemaan kohtisuoraan lävitseen. Tällaisia ovat esimerkiksi täydestä geometriasta leikatun sektorin säteen myötäiset reunat. (Luomi 1993)

Elementtimenetelmällä mallinnettava geometria jaetaan useisiin pieniin elementteihin, jotka muodostavat yhdessä koko alueen peittävän verkon. Verkossa ei saa olla päällekkäisyyksiä taikka reikiä (Luomi 1993). Elementtien koko voidaan valita vapaasti ja verkosta tehdään tiheämpi sellaisissa kohdissa, jotka ovat kriittisiä tarkastelun kannalta. Sähkökoneissa elementtiverkko on tarkempi pääasiassa ilmavälin läheisyydessä. Tarkka ilmavälin mallinnus on oleellista tulosten tarkkuuden kannalta. (Arkkio 1987)

Elementtimenetelmän perusajatus on ratkaista koneen kenttäyhtälöt erikseen jokaisessa verkon elementissä (Luomi 1993). Koneen kenttäyhtälöiden johtaminen Maxwellin yhtälöistä ja tarvittavien pelkistysten analysointi on käsitelty Arkkion väitöskirjassa (1987).

Elementtimenetelmä on analyyttisiin piirimalleihin nähden hyvin raskas ja vaatii huomattavan paljon laskentatehoa, sekä tarkan kuvauksen mallinnettavasta koneesta. Se huomioi kuitenkin ratkaisussaan asioita joita piirimalleissa ei huomioida, kuten: rautasydämen magneettisen kyllästymisen, johdinten virranahdon ja yliaallot. Elementtimenetelmän tuottamat tulokset ovat tämän johdosta tarkkuudeltaan hyviä.

## 3.2 Käytetyt ohjelmistot

### 3.2.1 FCSMEK

FCSMEK on Helsingin Teknillisessä Korkeakoulussa kehitetty ohjelmisto, jolla ratkaistaan sähkökoneisiin liittyviä magneettikenttäongelmia FEM:n avulla. FCSMEK koostuu useista aliohjelmista, joista tämän työn yhteydessä käytetään seuraavia:

- MESH, luo elementtiverkon käsiteltävän koneen geometrialle
- SYDC, laskee kaksiakselimalliin perustuvan ratkaisun tahtikoneen pysyvän (DC) tilan magneettikentille
- CIMTD, mallintaa koneen käyttäytymistä ajan funktiona käyttämällä aika-askellusmenetelmää ja pyörittämällä koneen roottorin geometriaa staattoriin nähden

(Arkkio 2001)

### 3.2.2 FEMM (Finite Element Method Magnetics)

FEMM on ohjelmisto matalataajuuksien sähkömagneettisten ongelmien ratkaisemiseen kaksiulotteisissa tasossa. (Meeker 2007)

Tässä työssä FEMM ohjelmistolla luodaan mallinnettavan koneen kaksiulotteinen poikkileikkaus, josta FCSMEK:n ohjelma MESH lukee geometriatiedot mallinnusta varten. Haluttu geometria määritetään FEMM:lle script-koodin avulla.

### 3.2.3 Adept

Adept toimii käyttöliittymäohjelmalla, joka mahdollistaa usean sähkölaskentaohjelman käytön yhdestä paikasta ja ottaa vastaan niiden tarvitsemat parametrit. Adeptille voidaan antaa muun muassa FEMM:n sekä FCSMEK:n tarvitsemia lähtöparametreja ja tämän jälkeen ajaa molemmat ohjelmat yhdellä napin painalluksella. Adept myös esittää käytettyjen ohjelmien antamat tulokset. (Ryyppö 2012)

### 3.2.4 THW32

THW32 on analyttinen laskentaohjelma, jota käytetään tahtikoneiden sähkösuunnittelussa. Ohjelma koostuu useista aliohjelmista, joita ohjataan yhteisen Windows-pohjaisen käyttöliittymän kautta. (Niemelä 2005)

Tahtikoneiden magnetointikoneiden laskentaan on oma aliohjelmansa nimeltään A045. Tästä ohjelmasta saatuja magnetointikoneen mittatietoja käytetään hyödyksi tämän työn simulaatiomallin suunnittelussa. A045:llä laskettuja sähköisiä parametreja käytetään lisäksi tässä työssä suuntaa antavina vertailuarvoina saaduille simulaatio ja mittaustuloksille.

### 3.3 Simulaatiomallin rakennus

Sähkökoneen toiminnan mallintaminen FEM:lla on tietokoneelta paljon laskutehoa vaativa tehtävä. Tarvittavien laskutoimitusten määrään vaikuttaa simuloitava geometria ja sen elementtiverkon solmujen määrä. Laskettavaa geometriaa on mahdollista pienentää olettamalla kone ja sen magneettikentän ratkaisu jaksollisesti symmetriseksi.

Haluamme tutkia magnetointikoneen staattorin kestopagneettinavan vaikutusta koneen sähköiseen toimintaan. Tähän tarkoitukseen tehdään simulaatioita varten kaksi koneen poikkileikkausta kuvaavaa geometriaa: symmetrinen geometria ja epäsymmetrinen geometria, jossa yksi staattorin navoista on korvattu kestopagneetilla. Kestopagneettinavallista geometriaa simuloidaan lisäksi magneetti magnetoituna ja magnetoimattomana. Näiden geometrioiden pohjalta suoritettuja simulaatiotuloksia tarkastelemalla pyritään muodostamaan kuva kestopagneettinavan vaikutuksesta magnetointikoneen sähköisiin parametreihin.

Magnetointikoneella on seitsemäntoista napaparia, joiden kentät voidaan symmetrisen geometrian tapauksessa olettaa olevan toisiinsa nähden samanlaiset. Näin voidaan luoda yksi seitsemästoistaosa sektori koko geometriasta, jota simuloimalla saadaan koko koneen kenttä määritettyä huomattavasti vähemmällä määrällä laskutoimituksia.

Tässä työssä kaikki lopulliset simulaatiot ajettiin kuitenkin kokonaisilla koneen geometrioilla, sillä sektorigeometrialla ja symmetrisellä täydellä geometrialla simuloitujen tulosten välille syntyi simuloidessa hienoisia eroja. Geometrioiden välille syntyneet erot aiheutuivat luultavasti pienistä eroista elementtiverkoissa. Täysi geometria valittiin, koska sen elementtiverkko on lähempänä kestopagneetillisen geometrian elementtiverkkoa ja näin ollen tulokset ovat paremmin vertailtavia. Käytetty symmetrinen FEMM ohjelmalla tehty yksi seitsemästoistaosa sektorigeometria esitetään kuvissa 1 ja 2.

Kestopagneettinavallinen geometria saadaan muodostettua muokkaamalla symmetristä geometriaa. Mallinnettavan magnetointikoneen staattorilla on 34 hammasta ja yksi hampaista on korvattu ferriittisellä kestopagneettinavalla. Kestopagneetin ympärille on kierretty erillinen käämitys, jota käytetään ferriittipalan kestopagnetointiin. Kestopagneetilliseen geometriaan ferriittipalan magnetointikäämistystä ei kuitenkaan lisätä, koska erillisen tasavirtakäämityksen lisääminen malliin on hankalaa. Lisäksi kuparin magneettikentänjohtavuus on heikko, joten käämin paikan korvaaminen ilmalla ei aiheuttane suurta virhettä. Käytetty kestopagneetillinen geometria on esitetty kuvassa 3.

Simulaatioissa ei huomioida tavallisessa käytössä mukana olevan 6-pulssi tasasuuntaajan vaikutuksia jännitteeseen taikka virtaan. Kaksiulotteinen geometria ei luonnollisesti pysty mallintamaan sähkökoneen vyyhdenpäitä, joten vyyhdenpäiden vaikutukset jäävät Adept-ohjelman analyttisen mallin varaan. Adeptin vyyhdenpäiden laskenta perustuu Rudolf Richterin kirjassa esitettyyn malliin. (Richter 1930)



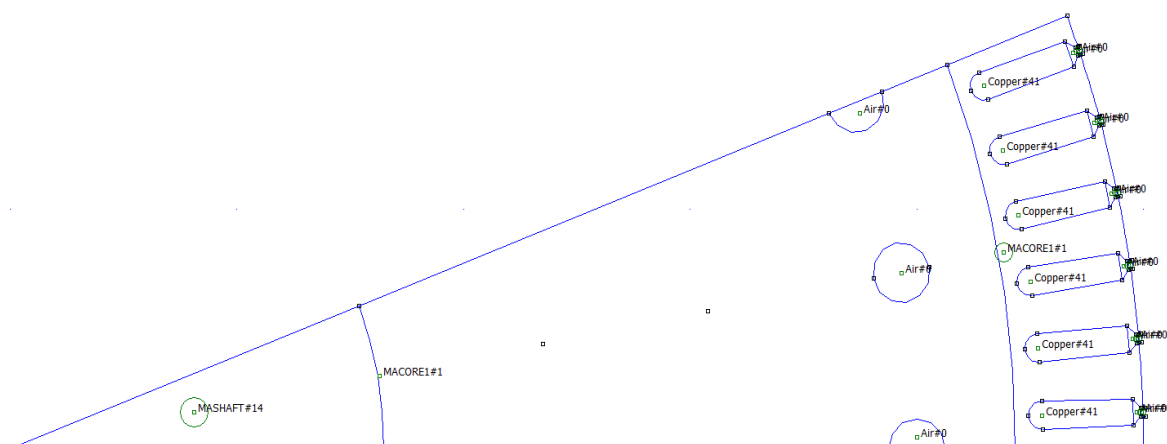
Magnetointikone mallinnetaan ns. ulkoroottorikoneena. Tällöin koneen ulompi osa, joka todellisuudessa on staattori DC-magnetoinnilla, mallinnetaan ulkoroottorina. Vastaavasti sisempi osa, joka todellisuudessa on kolmivaiheinen roottori, on nyt sisästaattori. Magnetointikone mallinnetaan siis tahtikoneena, jonka roottori sijaitsee staattorin ulkopuolella.

Magnetointikoneen roottorille ja staattorille määritetään omat geometriansa script-koodilla, jotka tallennetaan FCSMEK:n laskentakansioon. Täältä FEMM käsittelee ja tallentaa ne rotor.ans ja stator.ans tiedostoiksi kun simulaatio käynnistetään Adeptista. FCSMEK käyttää näitä tiedostoja geometriatietona laskennassa. (Ryyppö 2012)

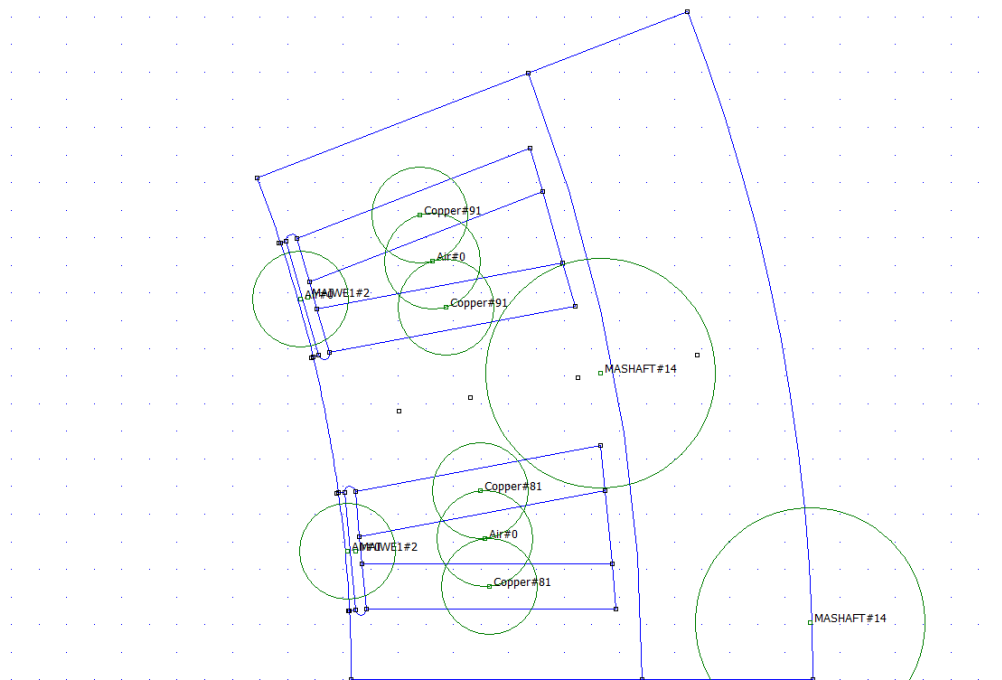
Lua-tiedostot kirjoitettiin Adeptin mukana tulevien staattori- ja roottori-urien valmiita lua-tiedostoja, sekä David Meekerin FEMM käyttöoppaassa esitettyjä komentoja hyödyntäen. (Meeker 2007)

Geometria määritellään lua-tiedostojen script-koodissa yksinkertaistetusti ilmaistuna asettamalla pisteitä koordinaatistoon ja yhdistämällä pisteitä toisiinsa viivoilla ja kaarilla. Kaikille viivojen rajaamille alueille määritetään tämän jälkeen materiaalimerkinnot. Tällainen alue voi olla esimerkiksi staattorikäämin ura, jolloin alueen materiaaliksi asetetaan kupari. Koodin peruskomennot on helppo oppia ja melko pienellä määrällä komentoja pystyy luomaan hyviä geometrioita. Script-koodi antaa käyttäjälle vapaat kädet geometrioiden määrittämiseen ja mahdollistaa monimutkaistenkin poikkileikkausten luomisen suhteellisen vähällä opettelulla.

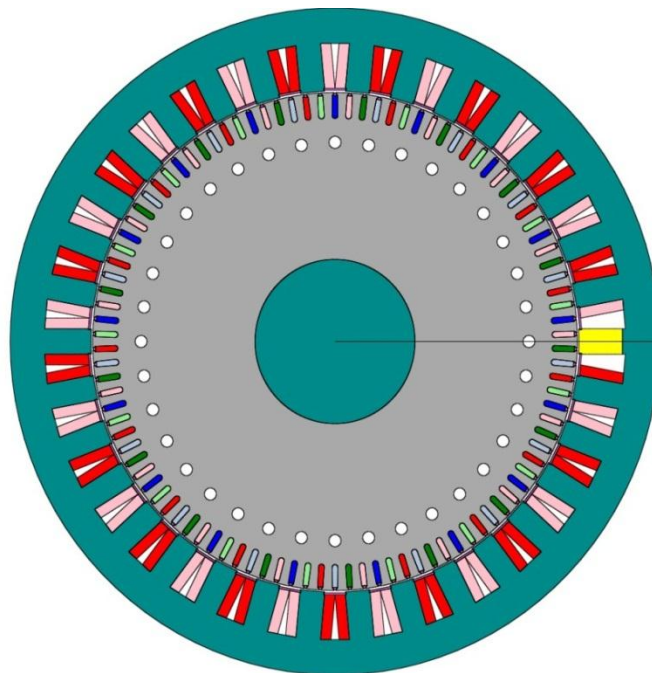
Simulaatioissa käytetyt geometriat toteutettiin ABB Oy:n magnetointikoneelle tehtyjen teknisten piirustusten, sekä materiaaleja koskevien tietojen pohjalta. Geometriat eivät ole aivan täsmällisiä kopioita piirustuksista, sillä muutamia yksinkertaistuksia jouduttiin tekemään. Muun muassa staattorin magnetointikäämien poikkileikkauksen koko ja sijainti, sekä roottorin rautaytimen tuuletuskanavat ovat hieman yksinkertaistettuja. Mallin geometria on kuitenkin lähellä todellisen koneen poikkileikkausta ja yksinkertaistuksen tehtiin siten, että niiden oletettiin vaikuttavan vain vähän koneen sähköiseen toimintaan.



Kuva 1. Roottorigeometrian seitsemästoistaosa FEMM ohjelmasta



Kuva 2. Staattorigeometrian seitsemästoistaosa FEMM ohjelmasta



Kuva 3. Kestomagneettillisen koneen täysi geometria

### 3.4 Mallinnettavat kokeet

Mallinnuksen tavoitteena on luoda mahdollisimman tarkka tietokonesimulaatio todellisista magnetointikoneelle tehtävistä mittauksista. Tähän on valittu IEC standardien mukaisesti suoritettavat mittaukset, joilla määritetään tahtikoneiden sähköisiä parametreja ja joille on laadittu selvät kokeellisesti varmennetut ohjeet. Mallinnuksen jälkeen kokeet suoritetaan todellisella koelaitteistolla ABB:n koekentällä.

Seuraavaksi esitellään koestukset, jotka magnetointikoneelle halutaan suorittaa ja jotka simuloidaan myös FCSMEK:llä.

#### 3.4.1 Magnetointikentän vaimeneminen (Field decay test)

Magnetointikentän vaimeneminen voidaan toteuttaa kahdella tapaa, kahden eri aikavakion määrittämiseksi.

Oikosulkuaikavakio  $\tau_d'$  pystytään määrittämään seuraavalla tavalla. Ajetaan konetta nimellisoikosulkupisteessä nimellisuopeudella ja avataan koneen magnetoinnin syöttö äkillisesti. Koneen virta lähtee putoamaan ja tasaantuu lopuksi jäännösmagnetoinnin arvoon. Syntyneestä laskevasta virran käyrästä vähennetään lopputilan virta ja määritetään aika, joka virralta on kestänyt laskea  $\frac{1}{e}$ -osaan ( $\approx 0,368$ ) magnetoinnin avaamishetken arvosta. Tämä virran laskemiseen kulunut aika on aikavakio  $\tau_d'$ .

Tyhjäkäyntiaikavakio  $\tau_{d0}'$  määritetään samalla tapaa. Koneita pyöritetään nimellistyhjäkäyntipisteessä ja magnetointi avataan. Määritetään aika jännitteen putoamiselle jännitteen käyrästä, kuten oikosulussa. (IEC 60034-4 2008)

#### 3.4.2 Jännitteen herääminen (Voltage recovery test)

Tässä kokeessa täytyy koneen kolmivaihepiiriin olla kytkettynä ohjattava oikosulkukatkaisija.

Pyöritetään konetta nimellisuopeudella ja säädetään magnetointi niin, että koneeseen saadaan puolet nimellisjännitteestä. Katkaistaan magnetointi, mutta säilytetään magnetoinnin säätöasetus puolelle jännitteelle. Ohjataan kolmivaihepiiri oikosulkuun, jonka jälkeen kytketään magnetointi takaisin päälle säilytetyillä asetuksilla. Kirjataan kolmivaihepiirin oikosulkuvirta ylös. Asetetaan piirturi tallentamaan jännitettä ja tämän jälkeen avataan oikosulkukatkaisija. Kolmivaihepiirin jännite alkaa kasvaa ja saadaan käyrä jännitteen heräämiselle. Saadusta käyrästä pystytään määrittämään muutostilojen reaktanssit  $X_d'$  ja  $X_d''$ , sekä aikavakio  $\tau_{d0}'$ . (IEC 60034-4 2008)

Tavallisesti tahtikoneissa jännitteen heräämiskoe suoritetaan puolella jännitteellä, jotta magneettipiirin saturoituminen ei vaikuttaisi tuloksiin. Tämän työn puitteissa on mahdollista tehdä koe nimellisjännitteellä puolen nimellisjännitteen sijasta, koska magnetointikoneen magneettipiirin kyllästymisen on alhainen nimellisjännitteelläkin. (Wenderin 2005)

### 3.4.3 Sysäysoikosulkukoe (Sudden short circuit test)

Sysäysoikosulkukokeen tehtävänä on parametrien määrittämisen lisäksi osoittaa koneen mekaaninen kestävyys oikosuluissa ja muissa häiriötilanteissa. Suuret oikosulkuvirrat aiheuttavat koneen johtaviin elementteihin voimavaikutuksen Lorenzin voimayhtälön mukaan.

Oikosulkua varten täytyy koneeseen olla kytketty oikosulkukytkin, aivan kuten jännitteen heräämisen yhteydessä. Koneita ajetaan nimellisnopeudella ja puolella nimellisjännitteellä tyhjäkäynnissä. Mittaukset asetellaan vaihevirroille ja kytketään kone kolmivaiheoikosulkuun. Virtojen tasaantumisen jälkeen avataan koneen magnetointi, jonka jälkeen oikosulkukytkin voidaan avata. (Pärssinen 2005)

Sysäysoikosulkukokeen virtakäyrästä voidaan määrittää koneen muutosreaktanssit  $X'_d$  ja  $X''_d$  sekä aikavakiot  $\tau'_d$  ja  $\tau''_d$ . (IEC 60034-4 2008)

Kuten jännitteen heräämisessä, voidaan myös sysäysoikosulussa koe tehdä puolen nimellisjännitteen sijasta täydellä nimellisjännitteellä.

### 3.4.4 Kokeiden mallinnus Adept:lla ja FCSMEK:llä

Ennen simulointia asetetaan mallinnettavan koneen arvot ja fyysiset mitat Adeptiin. Adeptista löytyy valmiita uramalleja staattorille ja roottorille, joiden avulla on helppo määrittää koneen poikkileikkauksen geometria. Tämän työn yhteydessä tarvittavia uria ei kuitenkaan löytynyt valmiina olevista pohjista. Tämän takia kirjoitettiin script-koodilla uudet tiedostot staattori- ja roottorigeometriaa varten, kuten luvussa 3.3 esitettiin.

Adeptilla voidaan kutsua useita ohjelmia, joiden avulla sille määritettyjen parametrien mukainen kone lasketaan. Haluamme tämän työn yhteydessä laskea koneen arvoja käyttäen FEM:iä, joten käskemme Adeptia kutsumaan FCSMEK:iä. Kun parametrit on asetettu oikein ja geometria tiedostot ovat simulaatiokansiossa, jää enää valittavaksi halutaanko ratkaista staattinen kenttäratkaisu SYDC:llä vai muuttuva aika-askellus CIMTD:llä.

FCSMEK:iä on helppo ohjata Adeptin käyttöliittymän lisäksi myös komentoriviltä. Tämän takia on usein käytännöllistä ajaa Adeptista ainoastaan FCSMEK:in pysyvän tilan ratkaisu SYDC ohjelmalla ja tämän jälkeen ajaa tarvittavat aika-askellukset komentorivin kautta. Kun SYDC on ajettu, pystytään aika-askellusohjelman CIMTD ja muiden FCSMEK:n aliohjelmien parametreja muuttamaan simulaatiokansioon syntyvästä FCSMEK\_calc.ini-tiedostosta. Tässä työssä aika-askelluksessa laskettiin 200 datapistettä jokaista koneen verkkojaksoa kohden. Koneen nimellistaajuuden ollessa 212.5 hertsiä on yhden aika-askelen pituus tällöin  $\frac{1}{212,5 \cdot 200} \approx 2.353 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ .

Pystyäksemme simuloimaan luvun 3.4 kokeet, tarvitsemme useimmiten kaksi simulaatiota peräkkäin, koska alkuarvoja ei pystytä muuttamaan kesken simulaation. Aika-askellusohjelma CIMTD pystyy jatkamaan simulaatiota SYDC:n ratkaisemasta vakiotilan ratkaisusta, jota voidaan pitää alkutilana ennen simuloitavissa kokeissa tapahtuvaa muutosta. Jos kuitenkin halutaan simuloida pysyvän tilan aaltomuotoa

ennen muutosta, on ajettava kaksi CIMTD simulaatiota tai käytettävä FCSMEK:ssä määriteltyjä syöttösignaaleja, jotka vaihtavat tilaansa simulaation aikana.

Ajettaessa CIMTD useita kertoja peräkkäin jatkuu simulaatio niistä ulostuloarvoista, joita edellinen laskenta tuotti. Tämä mahdollistaa jatkuvuuden kahden tai useamman simulaation välillä, vaikka simulaatioparametreja muutetaan simulaatioiden välissä.

Yllä esiteltyjen kokeiden tapauksessa simulaatiot suoritettiin vaihtelemalla roottorin jännitelähteen ja staattorin jännite- tai virtalähteen arvoja FCSMEK\_calc.ini-tiedostosta. Staattori saatiin ohjattua tyhjäkäyntiin asettamalla siihen virtalähde ja määräämällä virtalähteen virta nolllaksi. Vastaavasti staattorin oikosulku saatiin aikaan asettamalla sille jännitelähde nolllajännitteellä. Nimelliseen oikosulku- tai tyhjäkäyntipisteeseen päästiin säätämällä roottorin jännitelähteen arvoa. Kokeet saatiin simuloitua vaihtelemalla näiden lähteiden syöttöarvoja CIMTD:n ajojen välillä.

Simulaatiot ajettiin pääasiassa viiden sekunnin mittaisina. Tämä vastaa noin 212000 aika-askeleen laskutoimitusta, joka täydellä geometrialla laskettuna kesti ajallisesti useita tunteja. Seitsemästoistaosa sektorigeometrialla vastaava laskutoimitus kesti noin puoli tuntia.

Simulaation jälkeen tuloksista saadaan graafinen esitys FCSMEK Post-Processor ohjelmalla ja koneen simuloidut suureet tallentuvat simulaatiokansion tiedostoon cimtdtulos.csv, jonka dataa analysoimalla pystytään määrittämään koneen sähköiset parametrit.

## 4 Parametrien määrittäminen mallinnetusta datasta

FCSMEK asettaa simulaation ulostuloarvot tiedostoon cimtdtulos.csv, joka tallentuu kansioon, josta FCSMEK ajetaan. Tämän työn yhteydessä tiedoston dataa luetaan ja käsitellään Matlab-ohjelmalla. Mallinnettujen kokeiden datasta määritetään magnetointikoneen sähköiset parametrit IEC 60034-4 standardin mukaisesti. Lisäksi sysäysoikosulkukokeen simulaatiodatasta pyritään määrittämään parametreja käyränsovituksen kautta. Kokeista IEC standardin mukaan saatavat parametrit on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Eri kokeista IEC standardin mukaan ratkaistavat parametrit

	$X'_d$	$X''_d$	$\tau'_d$	$\tau''_d$	$\tau'_{d0}$
Magnetointikentän vaimeneminen			X		X
Jännitteen herääminen	X	X			X
Sysäysoikosulkukoe	X	X	X	X	

Taulukosta 1 nähdään, että valituilla kokeilla saadaan useimmat parametrit määritettyä kahdella eri tavalla.

Tahtikoneissa esiintyy nopea alkutilan aikavakio  $\tau'_d$ , joka muodostuu pääasiassa roottorin vaimennuskäämityksessä (Luomi, 1998). Magnetointikoneen tapauksessa vaimennuskäämityksiä ei ole, mutta magnetointikoneen staattorin umpiteräsnavat saattavat toimia vaimennuskäämityksen tavoin.

Teräksen kuparia huonompi sähkönjohtavuus, sekä teräksen saturoituminen rajoittavat umpinapojen pintaan syntyviä virtoja ja tästä johtuen  $\tau'_d$  parametri jää luultavasti pieneksi. Myös magnetointikoneen tavallista tahtikonetta korkeampi sähköinen taajuus, 212,5 hertsiä, rajoittaa magneettivuon tunkeutumissyvyyttä teräkseen, jolloin pyörrevirrat syntyvät pienempään tilavuuteen lähemmäksi navan pintaa. Pyörrevirtojen synnyttämä magneettikenttä pyrkii vastustamaan navassa tapahtuvaa magneettivuon muutosta.

IEC standardin mukaisten määrittysten lisäksi parametrien määrittästä yritetään tässä työssä sovittamalla sysäysoikosulun vaihevirran funktiota sysäysoikosulkuvirran mallinnuksesta saatuun dataan pienimmän neliösumman menetelmällä.

### 4.1 Sysäysoikosulkukoe

#### 4.1.1 IEC 60034-4

Aluksi määritetään oikosulkuvaihevirroille verhoikäyrät, jotka toteutetaan Matlab:ssa tallentamalla vaihevirran huippu ja minimiarvot jokaiselta jaksolta ja tallentamalla ne omiksi vektoreikseen. Tämän jälkeen vähennetään negatiivisen puolen vektori eli alempi verhoikäyrä ylemmästä verhoikäyrästä ja jaetaan saatu summavektori kahdella.

$$I_{ac} = \frac{(i_{yläverho} - i_{alaverho})}{2} \quad (2)$$

Tämän jälkeen määritetään jatkuvan tilan virta  $I_\infty$ , joka voidaan ottaa simulaatiodatan loppupään arvosta, jolloin virran muutos on lakannut. Vähennetään jatkuvan tilan virta virrasta  $I_{ac}$ .

$$I_1 = I_{ac} - I_\infty \quad (3)$$

Piirretään virta  $I_1$  virta-aika koordinaatistoon siten, että virta on esitetty logaritmisella asteikolla. Matlab:ssa tämä onnistuu semilogy-funktiolla. Syntyvä käyrä voi olla muodoltaan suora tai kaareva.

- a) Kun käyrän loppuosa on suora, ekstrapoloidaan tämä suora ajanhetkelle nolla.
- b) Kun käyrän loppuosa on kaareva, piirretään suora pisteiden  $I_a, t_a$  ja  $I_b, t_b$  kautta. Missä  $I_a, t_a$  on piste, jossa virran nopeat muutosilmiöt tulevat huomaamattomiksi ja  $I_b, t_b$  on piste, jossa  $I_b = \frac{I_a}{e}$ .

Kohdassa a) tai b) määritetyn suoran ja virta-akselin leikkauspisteestä saadaan määritettyä virta  $\Delta I'(0)$ , jonka avulla saadaan ratkaistua  $X_d'$  kaavasta 4:

$$X_d' = \frac{U_0}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I'(0)]} \quad (4)$$

missä  $U_0$  on tyhjäkäyntijännite hetkellä ennen oikosulkuun kytkemistä.

Muutosaikavakio  $\tau_d'$  on se ajan arvo, minkä kuluessa virta putoaa määritetyllä suoralla arvoon  $\frac{1}{e} \Delta I'(0)$ .

Määritetään vielä  $X_d''$  ja  $\tau_d''$ .

$$I_2 = I_{ac} - \Delta I' \quad (5)$$

Piirretään  $I_2$  puolilogaritmiseen koordinaatistoon, kuten  $I_1$ . Ekstrapoloidaan ajanhetkelle nolla, kuten aikaisemmin ja saadaan virta-akselin ja suoran leikkauspisteestä  $\Delta I''(0)$ .

Nyt voidaan ratkaista  $X_d''$  kaavan 6 mukaisesti:

$$X_d'' = \frac{U_0}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I'(0) + \Delta I''(0)]} \quad (6)$$

$\tau_d''$  on aika, joka kuluu kun virta putoaa suoralla arvoon  $\frac{1}{e} \Delta I''(0)$ .

Esitellään seuraavaksi, miten datasta määritetään muuttujat kaavoihin 4 ja 6. IEC standardin mukaisesti saatuun virran verhoikäyrän dataan sovitetaan yhtälö 7, joka näkyy logaritmisella y-asteikolla suorana:

$$y = p_1 * e^{(-t * p_2)} \quad (7)$$

Sovitus tehdään IEC standardin mukaisesti kaavalla 2 ja 3 muokatun datan kohtaan, jossa datajoukko näyttää suoralta, kun koordinaatiston y-akseli on logaritminen. Tämä

kohta on silmämääräisesti arvioitu, ja aiheuttaa analyysiin epätarkkuutta. Tämän sovitetun suoran parametrien  $p_1$  ja  $p_2$  avulla saadaan ratkaistua muutosvakiot  $X'_d$  ja  $\tau'_d$ :

Kun sovitettu käyrä 8 leikkaa y-akselin, eli  $t=0$ :

$$p_1 e^{-tp_2} = \Delta I'(0) \quad (8)$$

$$p_1 = \Delta I'(0) \quad (9)$$

IEC standardin mukaisesta yhtälöstä 4 saadaan:

$$X'_d = \frac{U_0}{\sqrt{3} [I(\infty) + p_1]} \quad (10)$$

Haluamme käyttää laskussa rms-arvoja, joten kaavan 10 muuttuja  $p_1$  tulee skaalata huippuarvosta rms-arvoksi. Virtamuoto ei ole täysin sinimuotoista, joten skaalauksessa käytetään  $\sqrt{2}$  arvon sijaan virran lopputilan huippuarvon sekä lopputilan rms-arvon suhdetta.

$$X'_d = \frac{U_0}{\sqrt{3} \left[ I(\infty) + \frac{p_1}{(I(\infty)_{\text{peak}}/I(\infty)_{\text{rms}})} \right]} \quad (11)$$

Lisäksi, kun virta suoralla on pudonnut arvoon  $\frac{1}{e}$ , saadaan:

$$p_1 e^{-tp_2} = \frac{\Delta I'(0)}{e} \quad (12)$$

Ja koska  $p_1 = \Delta I'(0)$ :

$$|-tp_2| = \ln\left(\frac{1}{e}\right) \quad (13)$$

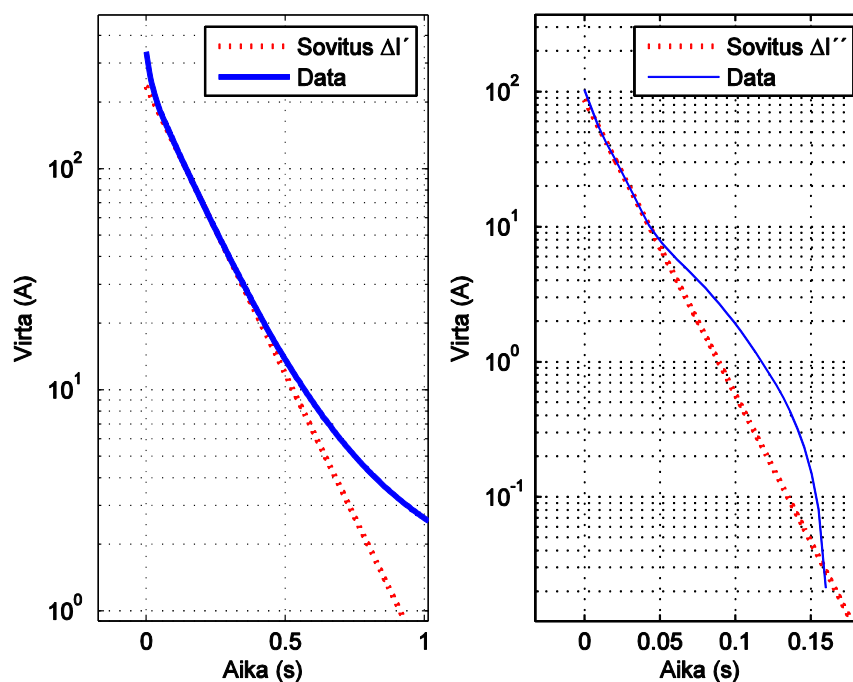
$$t = \frac{1}{p_2} \quad (14)$$

$\tau'_d$  on aika, jonka kuluessa virta laskee arvoon  $\frac{1}{e} \Delta I'(0)$ , joten saadaan:

$$\tau'_d = \frac{1}{p_2} \quad (15)$$

Muokkaamalla dataa yhtälön 5 mukaisesti saadaan käyrä, joka kuvaa koneen alkutilan muutosilmiötä. Tälle käyrälle sovitetun suoran parametreista voidaan ratkaista  $X''_d$  ja  $\tau''_d$  samalla tavalla kuin muutostilan parametreille edellä. Kuvassa 4 esitetään IEC standardin mukainen tapa ratkaista  $\Delta I'(0)$  ja  $\Delta I''(0)$  sekä aikavakiot. Sovitettujen suorien nollahetken arvot antavat parametrit  $\Delta I'$  ja  $\Delta I''$  ja suorien kulmakertoimista voidaan ratkaista aikavakiot  $\tau'_d$  ja  $\tau''_d$ .





Kuva 4. Parametrien määrittäminen IEC standardin mukaan sysäysaikavakion verhoikäyrästä

Merkataan seuraavassa taulukossa 2 näin saatuja muutostilan parametreja yläpilkulla ja alkutilan muutosparametreja kahdella yläpilkulla. Taulukossa on esitetty kaikilla kolmella eri geometrialla saadut tulokset.

Taulukko 2. Sysäysaikavakion IEC käyräsovituksista saadut parametrit

	$U_0$ (V)	$I_\infty$ (A)	$p'_1$	$p'_2$	$p''_1$	$p''_2$
Ilman PM	176,67	147,67	228,79	6,03	101,72	45,01
PM magnetoitu	176,59	150,51	225,36	5,73	100,67	43,57
PM magnetoimatta	176,68	150,97	227,52	5,73	102,01	42,39

Taulukon 2 arvoilla ratkaistut reaktanssit ja aikavakiot esitetään taulukossa 3.

Taulukko 3. Sysäysaikavakion IEC standardin mukaan määritetyt parametrit

	$X'_d$ (p.u.)	$\tau'_d$ (s)	$X''_d$ (p.u.)	$\tau''_d$ (s)
Ilman PM	0,4917	0,1659	0,3974	0,0222
PM magnetoitu	0,4902	0,1745	0,3969	0,0230
PM magnetoimatta	0,4880	0,1744	0,3947	0,0236

#### 4.1.2 Käyräsovitukset

Sovitus aloitetaan päättelemällä funktio, joka vastaa muodoltaan mallinnettua dataa parhaimmalla mahdollisella tavalla. Funktion muuttujille annetaan alkuparametrit, joiden odotetaan tuottavan hyvä sovitukset simuloidun datan kanssa. Tämän työn yhteydessä alkuparametreina käytetään A045 ohjelman laskemia parametreja.

Parametreilla lasketaan sovituskfunktion arvot simulaation datapisteiden ajanhetkillä. Näin saadaan kaksi ajallisesti ja datapistemääriltään samanpituista käyrää, simulaatiosta saatu data ja sovituskfunktioista saatu data, joiden datapisteet sijaitsevat samoilla ajanhetkillä. Samalla ajanhetkellä sijaitsevien pisteiden välinen erotus lasketaan ja korotetaan toiseen potenssiin. Saadaan pisteparien erotusten neliöt käyrien jokaiselle ajanhetkelle ja summataan ne yhteen. Näin on saatu laskettua kahden käyrän erotusten neliöiden summa. Tämä neliösumma halutaan minimoida, jolloin saadaan, käyrä joka vastaa muodoltaan parhaiten simuloitua dataa.

Neliösumma minimoidaan Matlabissa funktiolla fminsearch. Fminsearch tarvitsee neliösumman laskevan funktion, sekä alkuparametrit, joita varioimalla se etsii funktiolle minimiratkaisun. Fminsearch antaa ratkaisunaan parametrit, joilla minimiratkaisu saavutettiin. Nämä parametrit määrittävät funktion, joka kuvaa datan käyrämuotoa parhaalla mahdollisella tavalla.

Minimointia ohjataan määräämällä funktiolle raja-arvot, joita sen varioimat parametrit eivät saa ylittää. Rajat määritetään siten, että määritettävien parametrien fysikaaliset riippuvuudet pysyvät voimassa. Lisäksi rajoitetaan parametrien kasvua selvästi liian suuriin tai negatiivisiin arvoihin.

Seuraava kaava on sysäysoikosulkukokeen vaihevirralle (Luomi 1998):

$$i_{sa} = -\hat{u}_{s0} \left\{ \left[ \frac{1}{X'_d} + \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_d}} + \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau''_d}} \right] \cos(\omega t + \vartheta_{r0}) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cos \vartheta_{r0} - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cos(2\omega t + \vartheta_{r0}) \right\} \quad (16)$$

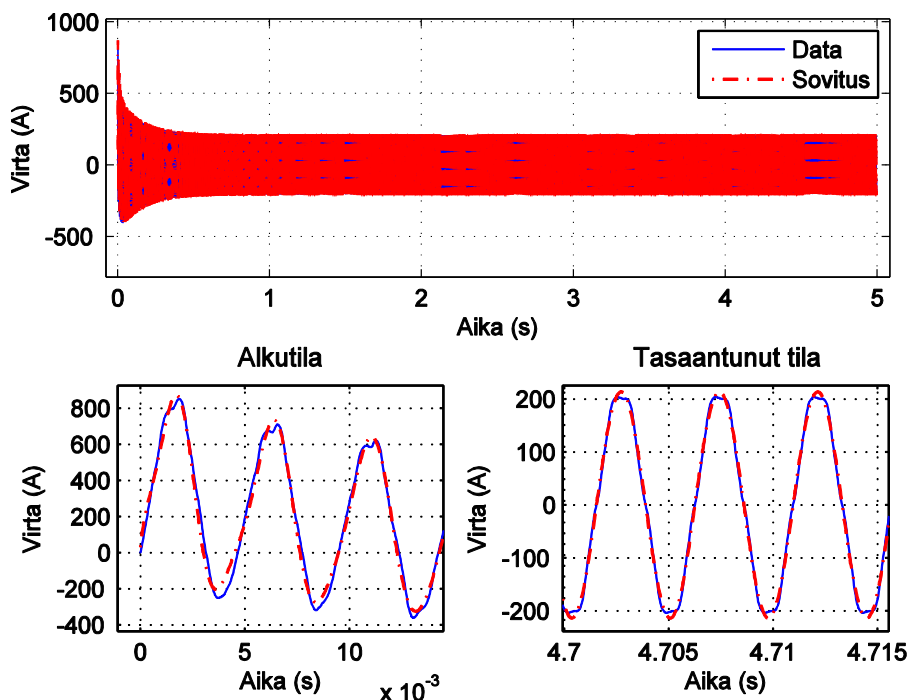
Kaavaa 16 käytetään arvauksena datan vaihevirran käyrämuodolle sovitusta tehtäessä ja sitä voidaan pitää hyvänä oletuksena simulaation ja mittausten tuottamille sysäysoikosulun virtojen muodoille.

Yhtälöä muokataan hieman olettamalla, että magnetointikoneessa ei esiinny juurikaan  $\tau''_d$  komponenttia. Tämä oletamus voidaan tehdä, sillä tämä nopea aikavakio syntyy pääasiassa tahtikoneen vaimennuskäämityksissä, jota magnetointikoneessa ei ole. Saadaan kaava:

$$i_{sa} = -\hat{u}_{s0} \left\{ \left[ \frac{1}{X'_d} + \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_d}} \right] \cos(\omega t + \vartheta_{r0}) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cos \vartheta_{r0} - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cos(2\omega t + \vartheta_{r0}) \right\} \quad (17)$$

Sovitus tehdään simuloidun kolmivaihevirran jokaiselle vaiheelle ja tällöin jokaisesta vaiheesta saadaan ratkaisu yhtälössä 16 esiintyvillä parametreille  $X_d, X'_d, X''_d, X''_q, \tau'_d$  ja

$\tau_a$ . Koneen parametrit saadaan laskemalla keskiarvot vaiheille määritetyistä parametreista. Kuvassa 5 on esitetty yhden vaiheen käyräsovitusta magnetoidulla kestopagneetilla lasketulle simulaatiolle.



Kuva 5. Käyräsovitusta yhdelle vaihevirralle

Taulukoissa 4, 5 ja 6 on esitetty magnetointikoneen eri geometrioilla tehdyistä sysäyssoikosuluista käyräsovituksesta saadut parametrit.

Taulukko 4. Käyräsovituksesta saadut parametrit symmetriselle koneelle, jossa ei ole kestopagneettinapaa

	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X'''_d(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau''_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,6595	0,2861	0,1689	0,2014	0,1482	0,0003	0,0123
$I_b$	0,6607	0,3521	0,2795	0,3395	0,1877	0,0748	0,0207
$I_c$	0,6600	0,2959	0,2385	0,2533	0,1570	0,0100	0,0162
Keskiarvo	0,6601	0,3114	0,2290	0,2647	<b>0,1643</b>	<b>0,0284</b>	<b>0,0164</b>
p.u.	<b>1,0079</b>	<b>0,4754</b>	<b>0,3496</b>	<b>0,4042</b>			

Taulukko 5. Käyräsovituksesta saadut parametrit koneelle, jossa kestopagneettinapa on magnetoitu

	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X'''_d(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau''_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,6465	0,2859	0,1702	0,2031	0,1553	0,0004	0,0123
$I_b$	0,6479	0,3878	0,2795	0,3380	0,2170	0,0925	0,0207
$I_c$	0,6471	0,2955	0,2382	0,2531	0,1646	0,0102	0,0162
Keskiarvo	0,6472	0,3231	0,2293	0,2647	<b>0,1790</b>	<b>0,0344</b>	<b>0,0164</b>
p.u.	<b>0,9882</b>	<b>0,4933</b>	<b>0,3501</b>	<b>0,4042</b>			

Taulukko 6. Käyräsovitukselta saadut parametrit koneelle, jossa kestopagneettinapa on magnetoimatta

	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X'''_d(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau''_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,6399	0,2813	0,1673	0,1997	0,1544	0,0003	0,0122
$I_b$	0,6413	0,4037	0,2755	0,3333	0,2277	0,0987	0,0205
$I_c$	0,6404	0,2909	0,2348	0,2493	0,1637	0,0102	0,0161
Keskiarvo	0,6405	0,3253	0,2258	0,2608	<b>0,1819</b>	<b>0,0364</b>	<b>0,0163</b>
<b>p.u.</b>	<b>0,9780</b>	<b>0,4967</b>	<b>0,3448</b>	<b>0,3982</b>			

## 4.2 Magnetointikentän vaimeneminen

Tyhjäkäyntiaikavakio  $\tau'_{d0}$  määritetään staattorin vaihejännitteen käyrästä.  $\tau'_{d0}$  saadaan ajasta, jossa alku ja lopputilan välinen jännite-ero pienenee  $\frac{1}{e}$ -kertaiseksi.

Oikosulkuaikavakio  $\tau'_d$  määritetään samalla tavoin ajamalla koe siten, että staattori on kytketty oikosulkuun.

Kuvassa 6 on esitetty jännitteen vaimeneman ylä- ja alaverhokäyrien erotuksen keskiarvo, josta on vähennetty tasaantunut lopputilan jännite. Kuvan 6 suora on raja, jolloin jännite on vaimennut arvoon  $\frac{1}{e}$ . Leikkauspisteestä voidaan nähdä nollahetkestä kulunut aika, joka on etsitty aikavakion arvo. Kuvassa 7 on esitetty tarkennus leikkauskohdasta, josta voidaan lukea aikavakio  $\tau'_{d0}$ .

Parametrit  $\tau'_d$  ja  $\tau'_{d0}$  ratkaistaan vastaavalla tavalla kaikille magnetointikoneen geometrioille. Kaikki jännitteen ja virran vaimenemisesta ratkaistut parametrit esitetään taulukoissa 7 sekä 8.

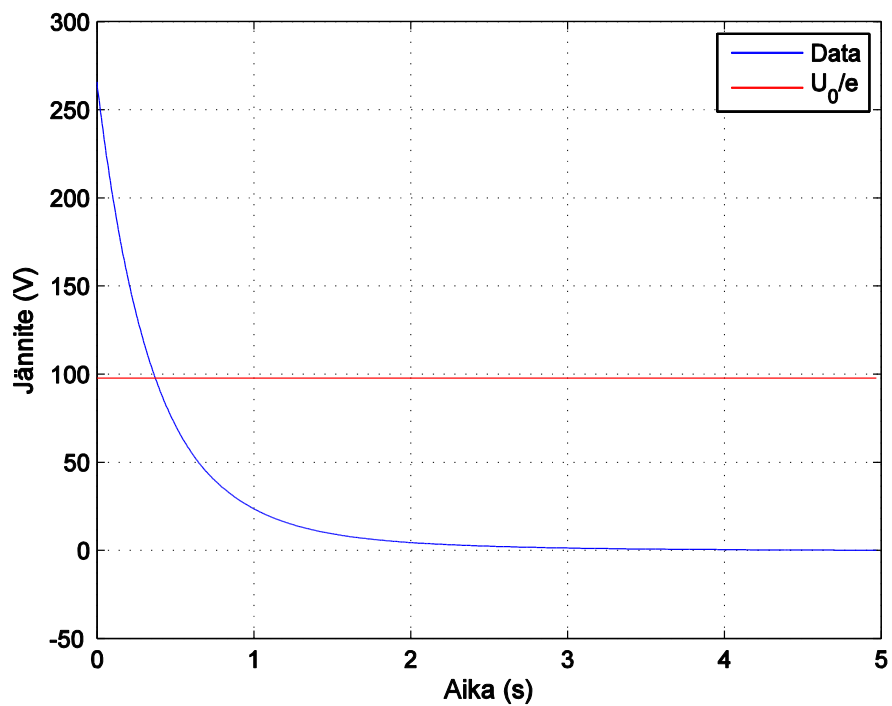
Jännitteen vaimenemiskokeissa konetta magnetoitiin siten, että kolmivaihekäämityksessä oli nimellisjännite ja virran vaimenemiskokeissa nimellisvirta ennen magnetoinnin avaamista.

Taulukko 7. Jännitteen vaimenemiskokeista ratkaistut aikavakiot

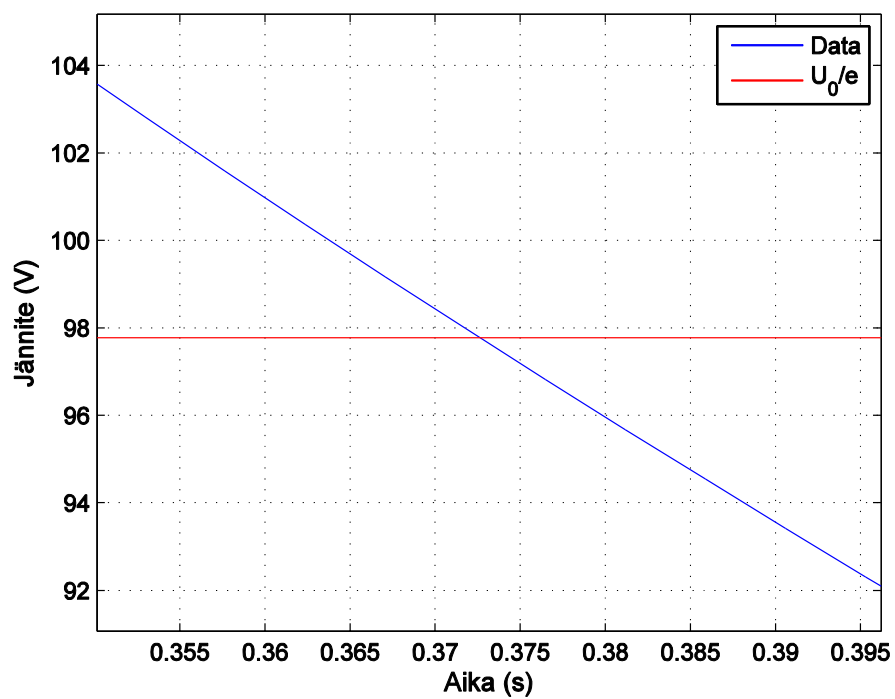
Jännitteen vaimeneminen	$\tau'_{d0} (s)$
Ilman PM	0,3623
PM magnetoitu	0,3726
PM magnetoimatta	0,3730

Taulukko 8. Oikosulkuvirran vaimenemiskokeista ratkaistut aikavakiot

Oikosulkuvirran vaimeneminen	$\tau'_d (s)$
Ilman PM	0,1620
PM magnetoitu	0,1702
PM magnetoimatta	0,1687



Kuva 6. Jännitteen vaimeneminen simulaatiossa, jossa kestopagneetti on magnetoitu



Kuva 7. Tarkennus kuvan 6 leikkauskohdasta

### 4.3 Jännitteen herääminen

Parametrit  $X'_d$ ,  $X''_d$  ja  $\tau'_{d0}$  ratkaistaan tämän kokeen tuloksista IEC standardin mukaan.

Aluksi määritetään heräävän jännitteen verhokäyrän, sekä pysyvän tilan jännitteen välinen ero.

$$\Delta U = U_\infty - U_{\text{verhokäyry}} \quad (18)$$

Saatu jännite piirretään koordinaatistoon, jossa jänniteakseli esitetään logaritmisella asteikolla. Tämän kuvaajan lineaarisen alueen kautta piirretään suora, joka ekstrapoloidaan ajan hetkelle nolla. Suoran ja jänniteakselin leikkauspisteestä saadaan alkujännite  $\Delta U'(0)$ .

Tästä saamme määritettyä:

$$X'_d = \frac{U_\infty - \Delta U'(0)}{I_K \sqrt{3}} \quad (19)$$

Missä  $I_K$  on staattorivirran rms-arvo ennen oikosulkukytkimen avausta. (IEC 60034-4)

Samaan tapaan pystytään standardin mukaan määrittämään myös  $\Delta U''(0)$ , kun määritetään käyrän  $\Delta U$  sekä  $\Delta U'$  erotus ja ekstrapoloidaan saatua käyrää aikaisempaan tapaan. Standardissa on annettu muuttujalle  $X''_d$  laskukaava:

$$X''_d = \frac{U_\infty - [\Delta U'(0) + \Delta U''(0)]}{I_K \sqrt{3}} \quad (20)$$

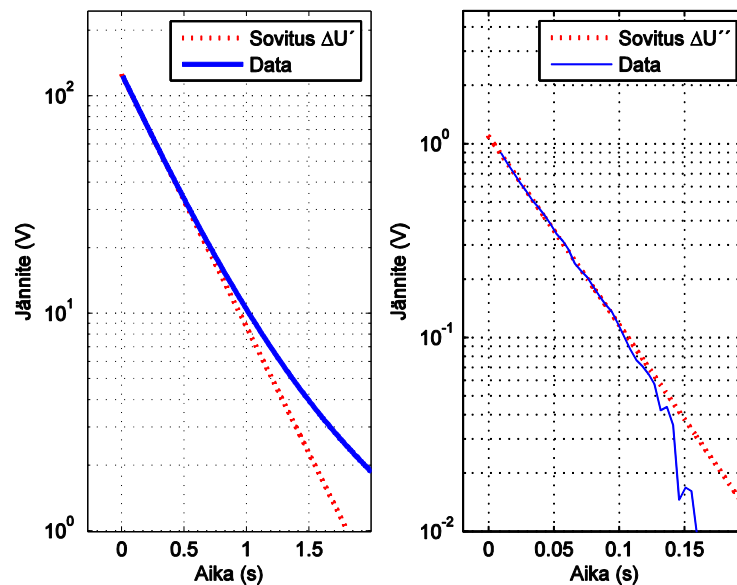
Tyhjäkäyntiaikavakio  $\tau'_{d0}$  määritetään ajasta jona jännite-ero pienenee  $\frac{1}{e}$  – osaan alkuarvostaan.

Määritetään parametrit IEC standardin mukaisesti. Kaavoihin 18, 19 ja 20 saadaan arvot simuloiduista datasta Matlab:in avulla. Tässä voidaan käyttää samoja Matlab-funktioita kuin sysäysoikosulkukokeen yhteydessä, kun koodiin tehdään pieniä muutoksia.

Otetaan jännitteen heräämisessä syntyvät ylä- ja alaverhokäyrät, summataan niiden itseisarvot yhteen ja jaetaan kahdella. Saadaan verhokäyrä, joka kuvaa jännitteen heräämistä. Tämä verhokäyrä esitetään kuvassa 8. Tasaantuneen tilan jännite  $U_\infty$  saadaan FCSMEK:in tuottamasta tiedostosta cimtdlosses.txt tai laskemalla jännitemuodon lopputilan rms-arvo.

Määritetään kuva jännitteen kasvusta kuten sysäysoikosulun yhteydessä ja määritetään ekstrapoloimalla arvot  $\Delta U'(0)$  ja  $\Delta U''(0)$ . Arvo  $I_K$  saadaan Matlab:sta laskemalla simulaation alkutilan vaihevirtojen rms-arvot ja ottamalla niistä keskiarvo.

Kuvassa 8 on esitetty sovitetut suorat, joiden avulla ekstrapoloidaan mallinnettua käyrää. Ekstrapoloitujen suorien parametrit, sekä alkutilan virta ja lopputilan jännite esitetään taulukossa 9. Parametrit määräytyvät funktiosta 7.



Kuva 8. Parametrien määrittäminen jännitteen heräämiskokeesta IEC standardin mukaan

Taulukko 9. Simulaation sovituksista saadut parametrit

	$U_{\infty}$ (V)	$I_K$ (A)	$p'_1$	$p'_2$	$p''_1$	$p''_2$
Ilman PM	177,13	155,2	125,9368	2,7106	1,6269	15,7866
PM magnetoitu	176,9	157,93	123,7296	2,6314	1,8426	15,7347
PM magnetoimatta	176,98	158,56	124,2319	2,6260	1,8616	13,8618

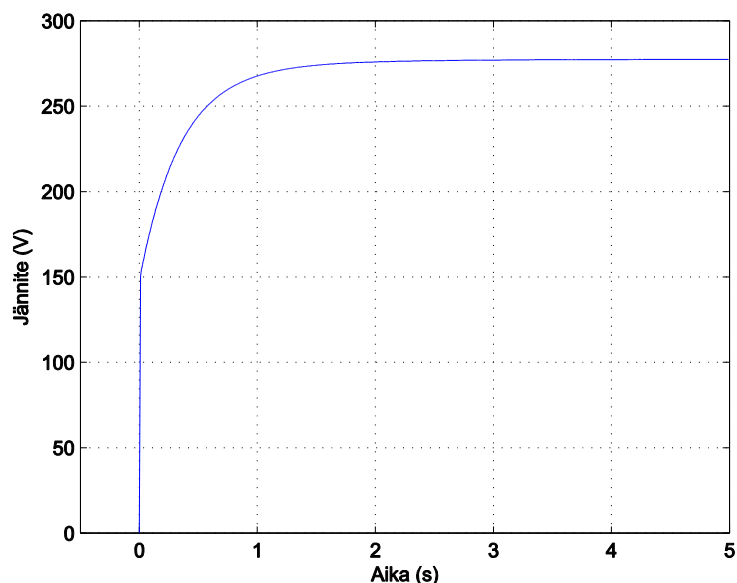
Kuten sysäysoikosulussa parametrissa  $p'_1$  saadaan sovitetun suoran ja y-akselin leikkauspisteen arvo, eli  $\Delta U'(0)$  ja vastaavasti parametrissa  $p''_1$  saadaan  $\Delta U''(0)$ , kun p-parametrit skaalataan peak-arvoista rms-arvoiksi. Magnetointikoneen jännitemuodon ollessa epäsinimuotoinen täytyy peak-rms suhde määrittää erikseen. Suhde saadaan määritettyä esimerkiksi simulaation lopputilan jännitteen huippuarvon ja rms-arvon suhteesta. Simulaatiolle, jossa kestopagneetti on magnetoituna, tämä arvo on noin 1,5682 kun ideaaliselle siniaallolle vastaava arvo on  $\sqrt{2}$ .

Parametrissa  $p'_2$  saadaan aikavakio  $\tau'_{d0}$ . Ratkaistut parametrit esitetään taulukossa 10.

Taulukko 10. Taulukosta 9 ratkaistut parametrit

	$X'_d$ (p.u.)	$X''_d$ (p.u.)	$\tau'_{d0}$ (s)
Ilman PM	0,5495	0,5436	0.3689
PM magnetoitu	0,5471	0,5537	0.3800
PM magnetoimatta	0,5434	0,5369	0.3808

Jännitteen herääminen tapahtuu kuvan 9 verhokäyrän esittämällä tavalla. Kuvasta nähdään, että jännite nousee ilmiön alussa lähes välittömästi lähelle 150 voltin arvoa, jonka jälkeen nousu jatkuu logaritmisesti.



Kuva 9. Simuloidun jännitteen heräämiskokeen verhoikäyrä

Tässä luvussa ratkaistut parametrit määritettiin siten, että jännitedatasta analysoitiin ainoastaan tämän nopean alkunousun jälkeistä osaa. Näin tehtiin, koska kuvan 9 mukaisesta datasta määritetyn parametrin  $X_d''$  arvo oli erittäin lähellä nollaa. Tämä poikkesi huomattavasti analyttisestä arvosta, sekä muista simulaatiotuloksista. Ongelma määrittelyn kannalta syntyy alkutilan nopeasta jännitteen noususta. Jännitteen hyvin nopea nousu saattaa johtua simulaation ideaalisesta teoreettisesta luonteesta, joka saattaa jättää huomiotta alkutilan muutokseen vaikuttavia seikkoja. Simulaatiossa muun muassa jännitteen heräämistä edeltävä oikosulkuvirta katkeaa välittömästi täydestä arvostaan nollaan. Todellisessa mittauksessa virran katkaisu ei onnistune näin ideaalisesti.

Oikosulkutilanteessa roottorin kolmivaihekäämitykseen indusoituvat virrat synnyttävät magneettikentän, joka painaa roottoripuolen magneettivuota lähemmäksi ilmapäliä. Kun oikosulku avataan, staattorin vuo pääsee helpommin kiertämään roottorin rautaytimen kautta. Oikosulussa roottorin kolmivaihekäämityksen läpi kulkee siis vain pieni osa magneettivuosta. Kun oikosulku avataan äkillisesti, pääsee lähes koko vuo taas kulkemaan käämityksen läpi indusoiden siihen jännitteen. Ideaalisen virrankatkaisun aiheuttama lähes välitön vuon muutos kolmivaihekäämityksen läpi voi aiheuttaa alun suuren jännitehypyn.

Hypyn takia datan alku leikattiin ja koska jäljelle jääneessä jännitemuodossa ei esiinny juurikaan alkuaikavakiota, ovat parametrit  $X_d'$  ja  $X_d''$  lähes samat.

#### 4.4 Virhetarkastelu

Parametreja määrittäessä on hyvä huomioida tuloksiin vaikuttavat virhetekijät, kuten tehtyjen sovitusten tarkkuus ja mahdollisten käyttäjälähtöisten virheiden mahdollisuus. Lisäksi on hyvä huomioida, että simulaatiot on laskettu käyttäen ensimmäisen asteen elementtejä, joiden tarkkuus on heikompi kuin suurempiasteisilla



simulaatioilla. Ensimmäisen asteen elementeillä lasketut simulaatiot ovat ajallisesti huomattavasti suurempiasteisia simulaatioita nopeampia suorittaa. Tästä syystä, sekä työssä tarvittujen monien simulaatioiden takia päädyttiin käyttämään ensimmäisen asteen elementtejä.

Sysäysoikosulkukokeessa parametrit määritellään kahdella eri menetelmällä: kokeellisella käyräsovituksella sekä IEC 60034-4 standardin mukaisesti. Pienimmän neliösumman minimointiin perustuvassa käyräsovituksessa on huomattavissa epätarkkuutta alkuperäisen datan ja siihen tehdyn sovituksen välillä kun tarkastellaan kappaleen 4.1.2 kuvaa 5.

Käyräsovituksen hyvyyteen vaikuttaa luonnollisesti yhtälö, jota käyrään pyritään sovittamaan. Tässä työssä käytetty yhtälö 16 ei ole luultavasti optimaalinen sovitus varten, mutta sillä saatu sovituksen tarkkuus vaikuttaa riittävän hyvältä tämän työn tarkoituksiin. Hyvin tarkkoja tuloksia haluttaessa sovittettavan yhtälön optimointi on suositeltavaa. Myös käytetylle minimointimenetelmälle voisi löytyä tarkempia sovituksia tuottava vaihtoehto. Käyräsovituksen optimoinnille on esitetty muutamia vaihtoehtoja Olli Mäkelän lisensiaatti työssä Parameter estimation for synchronous machine models. (Mäkelä 2009)

Käyränsovitusta tehtäessä ilmenee lisäksi optimointikysymys, joka liittyy sovituksen pituuteen. Datalla, jolle sovitus tehdään, tulee esiintyä koko sysäysoikosulussa syntyvä virran muutostila, sekä myös tasaantunutta virtamuotoa. Ongelmana on määrittää sovitukseen sisällytettävän tasaantuneen tilan määrä. Jos sovitus tehdään datalle, jossa virta on tasaantuneessa tilassa huomattavasti suuremman osan ajasta kuin muutostilassa, painottuu minimineliosumman sovitus tarkemmaksi tasaantuneelle tilalle ja muutostilan sovitus kärsii. Toisaalta, jos tasaantunutta tilaa esiintyy hyvin vähän, painottuu sovitus tarkemmaksi muutostilan osalta. Tämän ongelman kiertämiseksi, voisi sovitus yrittää siten, että ensin sovitus tehtäisiin pelkästään virran tasaantuneelle osalle. Tämän jälkeen alkuperäisestä virtamuodosta vähennettäisiin tasaantunut osa, jolloin jäljelle jäisi ainoastaan muutostilan ja alkutilan komponentit. Tämän jälkeen sovitus tehtäisiin erikseen myös näille osille.

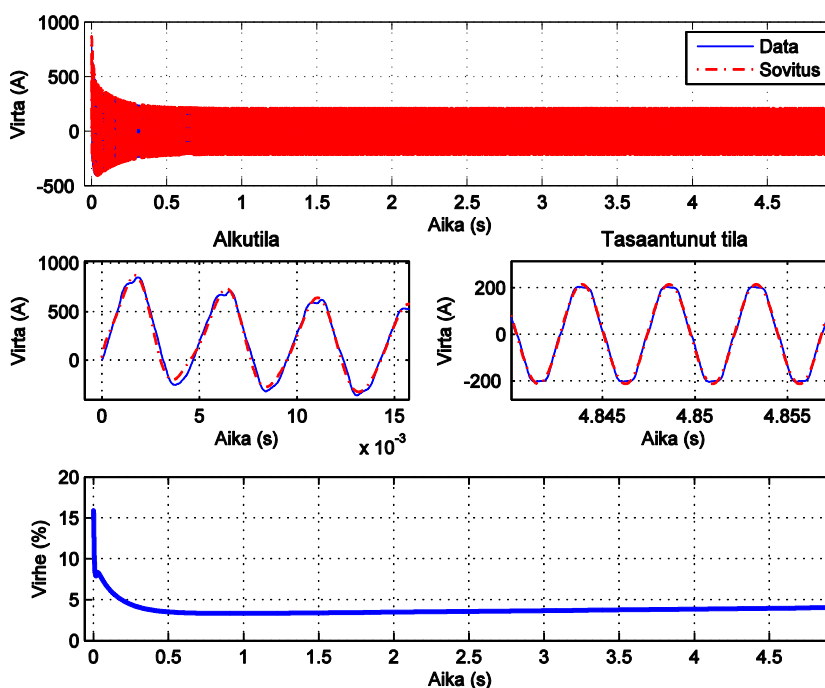
#### 4.4.1 Sysäysoikosulun käyräsovituksessa syntyvä virhe

Sysäysoikosulkukokeen simulaatiosta saatuun vaihevirran dataan pyritään sovittamaan kaavan 16 mukainen funktio mahdollisimman tarkasti. Täydelliseen sovitukseen ei kuitenkaan päästä, joten on hyvä tarkastella, kuinka paljon sovitettu käyrä poikkeaa datan määrittämästä käyrästä. Hyvä käsitys sovituksen tarkkuudesta saadaan laskemalla sovituksesta saadun käyrän ja simuloidun datan välinen erotusvektori, joka skaalataan sopivalla tavalla. Tässä skaalaus on tehty jakamalla käyrien pisteiden välinen vektori sen hetkiselä oikosulkuvirtojen verhoikäyrän arvolla, josta on poistettu DC-komponentti. Skaalauksen jälkeen vektori kerrotaan vielä sadalla, jotta tulokset saadaan prosentteina.

$$\text{virhe}\% = \frac{\Delta I}{\hat{I}} * 100 \quad (21)$$

Näin kolmelle vaiheelle syntyvistä virhevektoreista tulee sinimuotoisesti vaihtelevia ja siksi jokaiselle vaiheelle saatu virhevektori suodatetaan vielä liukuvalla keskiarvolla. Liukuvalla keskiarvolla käsitellyistä kolmesta virhevektorista otetaan vielä yhteinen keskiarvovektori, jolla kuvataan kaikkien vaiheiden yhteistä sovitusvirhettä. Liukuva keskiarvo kuvaa virhettä eri käyrän kohdissa koko käyrästä otettua keskiarvoa paremmin, sillä määritettävät parametrit ovat riippuvaisia ajanhetkeä, jota ei pystyittäisi näkemään koko keskiarvon tuottamasta skalaariluvusta.

Simuloiduille sysäysoikosulkukokeille laskettiin jokaiselle vaiheelle virhevektorit yllä selostetulla tavalla. Saaduista kolmesta virhevektorista laskettiin keskiarvo, joka kuvastaa koko sovituksen virhettä ajan suhteen. Saaduista virhekuvaajista pystytään arvioimaan sovituksessa syntyvää virhettä eri reaktanssiarvoihin. Kuvassa 10 on esitetty virhekäyrä sovituksesta sysäysoikosulun simulaatioon, kun kestopagneettina on magnetoituna. Virhekäyrät simulaatioille kestopagneetti magnetoimattomana ja ilman kestopagneettia ovat lähes identtisiä kuvan 10 kanssa.



Kuva 10. Käyräsovituksen virhe esitettynä ajan suhteen simulaatiolle jossa kestopagneettina on magnetoitu

Sovitettaessa sinimuotoista funktiota diskreettiin dataan on hyvä huomioida datapisteiden välinen askelpituus. Sinimuotoista käyrää kuvaavan datan askelpituuden tulee täyttää Nyquist kriteeri, jotta sovitukseen ei synny laskostumista. Näytteenottotaajuuden on oltava yli kaksinkertainen koneen sähköiseen taajuuteen nähden. Tässä työssä otettiin 200 näytettä verkkojaksoa kohti, joita on 212,5 sekunnissa. Näytteenottotaajuus on siis 42500 hertsiä, joka on huomattavasti enemmän kuin kaksi kertaa koneen sähköinen taajuus.

Tarkastellessa kuvan 10 alkutilaa tarkemmin huomataan, että virhe putoaa sovituksen alussa hyvin nopeasti. Virhe putoaa huippuarvostaan, noin kahdeksastatoista prosentista, lähelle noin kahdeksan prosentin virhettä muutaman verkkojakson aikana.

Tästä voidaan päätellä, että suurin virhe sovituksista syntyy parametreihin, jotka esiintyvät syysoikosulun ensimmäisten verkkojaksojen aikana. Näitä vakioita ovat  $X_d''$ ,  $X_q''$  ja  $\tau_d''$ . Sovituksen virhe transienttitilan parametreihin vaikuttavaan osaan käyrästä on noin kolmesta kahdeksaan prosenttia ja tasaantuneessa tilassa virhe on noin kolmesta neljään prosenttia.

#### 4.4.2 Virhelähteet IEC standardin mukaisessa määrittämisessä

Parametrien määrittäminen IEC standardien avulla on hyvin pitkälti graafista tarkastelua, jota on käytetty jo kauan ennen tehokkaiden tietokoneiden yleistymistä. Graafisten menetelmien sisältämät tulkinvaraisesti piirretyt ekstrapoloinnit jättävät usein varaa arvailulle ja saatavat parametrit voivat vaihdella hieman määrittäjäkohtaisesti. Menetelmää on kuitenkin menestyksekkäästi käytetty jo kymmeniä vuosia, joten graafisten menetelmien suurpiirteisyydestä huolimatta tulokset ovat hyvin käyttökelpoisia.

Tämän työn graafisissa parametrien määrittämisissä piirretään ekstrapolointisuoria koordinaatistoon, jossa virta-akseli on esitetty logaritmisenä. Tälle asteikolle tulkinvaraisesti piirretyt ekstrapolointisuorat aiheuttavat helposti heittoa logaritmiselta akselilta luettuihin arvoihin. Pienikin muutos suoran kulmakertoimessa voi muuttaa tulosta havaittavissa määrin.

Käytetystä verhoikäyrän määrittämisestä johtuen syntyy IEC standardin mukaisiin määrittämiin pieni siirtymä aika-akselin positiiviseen suuntaan. Verhoikäyrän määrittävä funktio käy datan läpi ikkuna kerrallaan, tallentaen kunkin ikkunan suurimmat ja pienimmät arvot ylä- ja alaverhoikäyrän vektoreihin. Ikkunan näytemäärän voi käyttäjä valita itse. Tässä työssä ikkunan kokona käytettiin yhden verkkojakson aikana tallennettua näytemäärää. Tallennettuaan minimi- ja maksimi-arvot lisää funktio ajanhetken aikavektoriin käsiteltävien näytteiden määrän mukaisesti. Tällöin tallennetut arvot saavat huippujensa ajoiksi ikkunoihinsa viimeisen käsitellyn pisteen ajanhetken. Koska minimi- ja maksimi-arvot eivät tyypillisesti esiinny käsiteltävän näyteikkunan reunalla, siirtyy niiden todellinen paikka aika-akselilla. Syntynyt kokonaisvirhe on maksimissaan käsitellyn näyteikkunan ajallinen pituus. Ikkunan näytemäärä on syytä valita mahdollisimman tarkasti yhden verkkojakson mittaiseksi tai verhoikäyriin voi syntyä virheellisiä pisteitä tai huippupisteitä voi kadota.

Huippujen siirtymä aika-akselilla positiiviseen suuntaan aiheuttaa IEC:n mukaisesti määritetyille aikavakioille virheet kaavan 22 mukaisesti.

$$E_{\text{siirtymä}} = \frac{1}{f_s} n \quad (22)$$

jossa  $E_{\text{siirtymä}}$  on virhe sekunteina,  $n$  on ikkunan näytemäärä ja  $f_s$  on näytteenottotaajuus. Simulaatioista määritetyille aikavakioille virhe  $E_{\text{siirtymä}}$  on enimmillään  $\frac{1}{212.5 \text{ Hz}} \approx 4.706 \text{ ms}$ .

## 5 Magnetointikoneen mittaukset

Työn kokeellisen osuuden tavoitteena on koota ja koestaa mallinnusosuudessa simuloitua konetta vastaava laitteisto. Koestamalla halutaan määrittää samat parametrit, kuin mitä mallinnusosuudessa saatiin simuloimalla. Magnetointikone koestettiin ABB Oy Pitäjänmäellä Helmikuussa 2013.

Mittausten koekenttänä toimi ABB Oy Pitäjänmäen äänilaboratorio, josta saatiin varattua tarpeeksi aikaa mittausten suorittamista varten. Äänilaboratorio soveltuu hyvin tämänkaltaisen erityismittauksen tarkoituksiin tilavuutensa ja turvallisuutensa ansiosta. Laboratoriossa on paksut seinät ja teräsovet, joilla koelaitteisto saadaan täysin suljettuun tilaan koestuksen ajaksi.

Mittauspiste sijoitettiin äänilaboratorion ovien ulkopuolelle, missä mittaajat olivat turvassa vaikka pyörivästä koelaitteistosta olisi irronnut kappaleita. Kaikki koelaitteistoon liittyvät ohjaustoimenpiteet ja mittaukset pystyttiin suorittamaan äänilaboratorion ulkopuolelta.

Tässä luvussa esitellään koestettu laitteisto, koejärjestelyt, suoritettut kokeet ja niiden tulokset. Tulosten tarkastelu suoritetaan luvussa 6.

### 5.1 Magnetointikoneen hankinta ja asennus

Valmistautuminen suoritettaviin mittauksiin alkoi heti työn alkuvaiheessa kun tutkimussuunnitelma oli laadittu. Mittauksia varten päätettiin tilata uusi magnetointikone tuotekehitystä varten ja sitä ei sidottu ABB:n asiakkaalle menevään projektiin. Tämä mahdollisti joustavat aikataulut mittauksia suunnitellessa. Tilaus oli saatava tehtyä hyvissä ajoin diplomityön alkuvaiheessa, sillä osien toimituksessa menisi vähintään kuukausi.

Mitattava kone valittiin tyypillisen ABB:llä valmistettavan generaattorin magnetointikoneen mukaiseksi. Suoritettavien kokeiden takia koneeseen tavallisesti asennettava diodisilta päätettiin korvata tyristorisillalla, jonka DC-kiskot pystytään ohjaamaan oikosulkuun. Koneen pyörittämistä varten löytyi ABB:ltä kestopagneettinapojen kestävyyskokeissa käytetty moottoroitu akselipukki. Magnetointikoneen liittämiseksi pyörityslaitteeseen tarvittiin lyhyt jatkoakseli, sekä muita asennusautoja. Nämä asennustarvikkeet suunnitteli ABB:n mekaniikkapuolen tuotekehitysinsinööri. Lopuksi valittiin magnetointikoneen roottorille tarvittavat virtamittausanturit. Virtamittaukseen päätettiin käyttää ABB:llä tahtikoneiden roottorivirtamittauksissa käytettyjä Hall-antureita niiden sopivan virta-alueen ja fyysisen rakenteen takia.

Magnetointikoneen tilausta varten oli alihankkijoille määritettävä tarkat osaluettelot kaikista komponenteista. Komponenttien valinnassa ja luetteloiden teossa saatiin paljon apua ABB Pitäjänmäen toimiston ammattilaisilta. Varsinainen komponenttien tilaus tehtiin ABB:n ostajien toimesta.

Komponenttien saavuttua alihankkijoilta oli magnetointikoneen staattori ja roottori vielä kyllästettävä Pitäjänmäen tehtaalla. Kyllästyksessä kone käsiteltiin hartsilla, joka

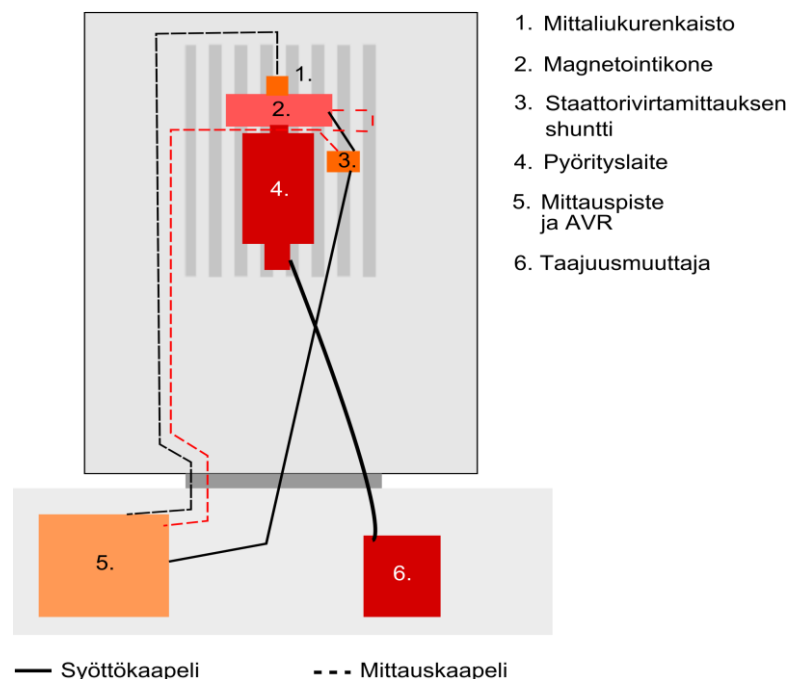
suojaa koneen käämityksiä kosteudelta. Kyllästämön jälkeen kone lähetettiin roottorikokoonpanoon, missä magnetointikoneen roottori tasapainotettiin. Tällä varmistettiin, että roottori ei tärise liikaa pyöriessään. Tavallisesta poikkeavana lisätyönä oli tyristorisillan muokkaaminen. Käytetty siltatyyppe oli alun perin suunniteltu sähkömoottorille ja siihen jouduttiin tekemään muutamia muutoksia, jotta se sopi tarkoituksiimme. Sillan muokkaukset ja roottorin tasapainotuksen teki roottorikokoonpanon asentaja.

Magnetointikone asennettiin koestamista varten Pitäjänmäen ABB:n äänilaboratorioon. Vaativat asennustyöt teki ABB Servicen asentajat. Näihin kuului muun muassa magnetointikoneen roottorin liittäminen pyörityslaitteeseen, sekä magnetointikoneen ilmapälin kohdistaminen.

Kun kone oli kiinnitetty koekenttään, päästiin asentamaan mittauksissa tarvittavaa laitteistoa. Mittausten asennuksessa auttoivat ABB:n koekentän väki sekä tuotekehityspuolen insinöörit.

## 5.2 Mitattava laitteisto, mittalaitteet ja pohjapiirustus

Koekentästä on hahmoteltu suuntaa-antava pohjapiirustus kuvassa 11, jotta tämän kappaleen kuvaus mittajärjestelyistä olisi helpommin hahmotettavissa.



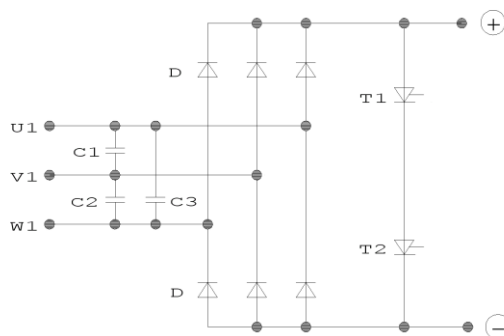
Kuva 11. Koekentän laitteiston pohjakuva

Koestettava magnetointikone on samaa konetyyppiä, jonka pohjalta luvussa kolme toteutettiin simulaatioissa käytettävä malli. Magnetointikoneeseen liitettiin diodi-/tyristorisilta, jonka avulla koneen roottori voitiin ohjata oikosulkuun kokeiden suorittamista varten. Sillan tyristorit ohjattiin johtavaan tilaan syöttämällä tyristorin hilan ja katodin välille tasajännite. Kokeissa käytetyn tyristorisillan kaavio on esitetty kuvassa 12. Sillan positiivisen ja negatiivisen DC-kiskon välillä on kaksi tyristoria vaikka yksikin olisi riittänyt. Tämä johtuu siitä, että silta on alun perin suunniteltu eri

käyttökohteeseen ja sitä jouduttiin muokkaamaan tämän työn mittauksia varten. Sillan rakenteesta johtuen oli helpompaa jättää molemmat tyristorit paikalleen.

Koneesta haluttiin mitata erityisesti roottorin jännitteet ja virrat. Koneen matalan vaihejännitteen ansiosta jännite voitiin mitata suoraan roottorin vaiheisiin kiinnitetyillä kaapelivedoilla, jotka liitettiin mittalaitteena toimineeseen oskilloskooppiin.

Virtamittaus toteutettiin asentamalla roottorin vaiheisiin Hall-anturit. Hall-anturit tarvitsevat apujännitteitä +15V, 0V sekä -15V, sekä antavat ulostulostaan  $\pm 4V$  jännitetiedon, jota skaalaamalla saatiin määritettyä vaihevirrat. Hall-anturit asennettiin kuvassa 12 esitettyihin vaiheisiin U1, V1 ja W1.



Kuva 12. Koetuksessa käytetty tyristorisilta

Mittatietojen saamiseksi ja apujännitteiden syöttämiseksi roottorille asennettiin koneen päähän apu-akselille kaksitoistakanavainen mittaliukurengaspaketti. Liukurengaspaketista käytettiin yksitoista kanavaa:

- kolme kanavaa Hall-anturien ulostuloille
- kolme kanavaa Hall-anturien apujännitteille
- kolme kanavaa vaihejännitteille
- kaksi kanavaa tyristorien sytytykseen tarvittavalle tasajännitteelle

Magnetointikoneen staattorilta mitattiin jännite ja virta. Jännitemittaus tehtiin roottorin tavoin suoralla kaapelivedolla oskilloskoopille. Staattorin virtamittaus toteutettiin ohjaamalla virta 15A/50mV shuntin lävitse, jonka yli syntyvä jännite mitattiin oskilloskoopilla ja skaalattiin näyttämään shuntin läpikulkeva virta.

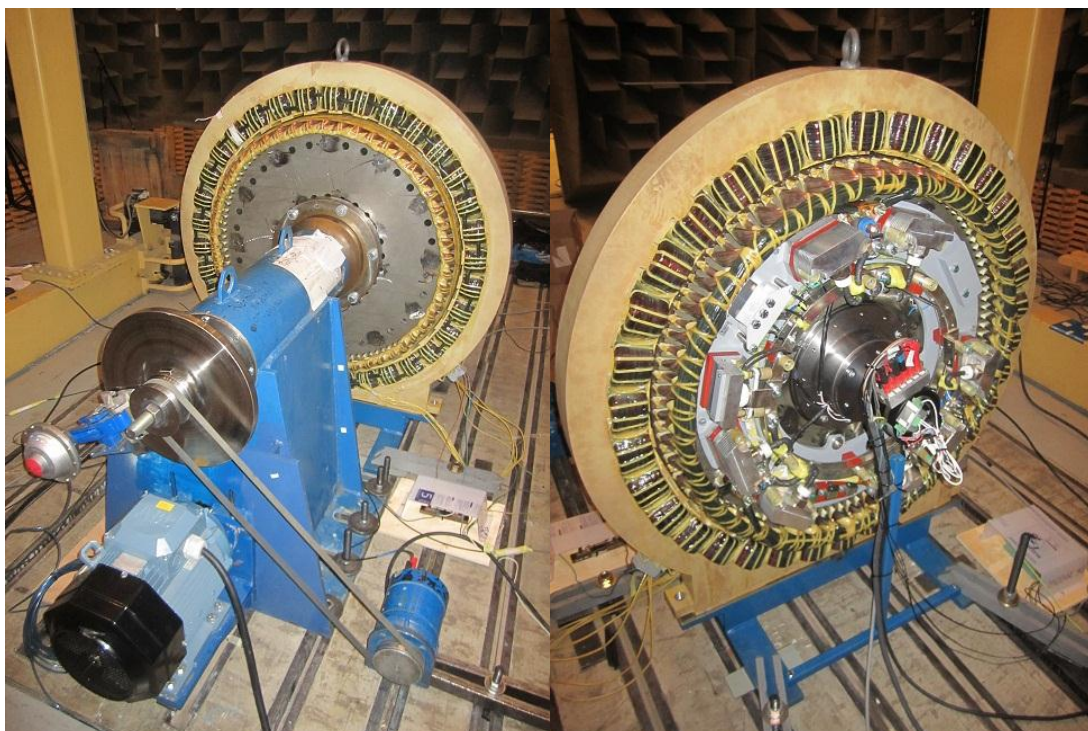
Koneen pyörimisnopeuden määrittämiseksi käytettiin takometriä, joka tuottaa 0,1 voltin jännitteen jokaista minuutissa tapahtuvaa kierrosta kohden. Takometri oli yhdistetty pyörityslaitteeseen 1:1 muuntosuhteella olevan hihnan kautta. Takometri hihnoineen on hyvin näkyvissä kuvan 13 a) etu-alalla. Myös takometrin jännitteen mittaus toteutettiin kaapelivedolla oskilloskoopille. Mittalaitteena käytetty digitaalinen oskilloskooppi on mallia Yokogawa DL750, jolla toteutettiin kaikki kokeisiin liittyvä datan mittaus ja tallennus. Mittauspiste laitteineen on esitetty kuvassa 14.

Magnetointikoneen pyörittämiseksi tuotiin koekentälle erillinen pyörityslaitte, jonka akselille roottori asennettiin. Pyörityslaitte on koekentän lattiaan kiinnitettävä teräsjalusta, jossa on kuulalaakeroitu akseli. Pyörityslaitteen akselia pyöritetään hihnavetoisesti 18,5 kW induktiomootorilla, jota ohjataan pyörityslaitteen mukana



kulkevalla 37 kW ACS550 taajuusmuuttajalla. Pyörityslaite ja sitä pyörittävä moottori on esitetty kuvassa 13 a). Taajuusmuuttaja saa tehonsyöttönsä kolmevaiheisesta 400 voltin pistokkeesta. Pyörityslaitteessa on myös paineilmalla kytkettävä hätäjarru, jolla laitteisto saadaan tarvittaessa pysähtymään nopeasti.

Magnetointikoneen magnetointivirta syötettiin Unitrol 1000 jännitesäätimellä. Jännitesäädintä ohjattiin tietokoneella manuaali-tilassa, jossa käyttäjä pystyy asettamaan itse halutun ulostulojännitteen ja muuttamaan sitä vaivatta. Tehonsyöttönsä AVR saa 230 voltin verkkopistokkeesta. Sähkönsyötön kannalta koejärjestelyt olivat helposti toteutettavissa, sillä kaikki tarvittava sähköteho pystyttiin ottamaan suoraan tavallisista työpaikkakeskuksista.



Kuva 13. a) Koestettavan laitteiston D-pää

b) Koestettavan laitteiston N-pää.



Kuva 14. Mittauspiste

## 5.3 Valmistelevat kokeet

Ennen varsinaisia mittauksia koneelle suoritettiin muutamia tarkastuksia ja mittauksia, jotka voivat ilmentää mahdollisia vikoja mitattavassa koneessa.

### 5.3.1 Koneen ulkoisen kunnon ja asennuksen tarkastaminen

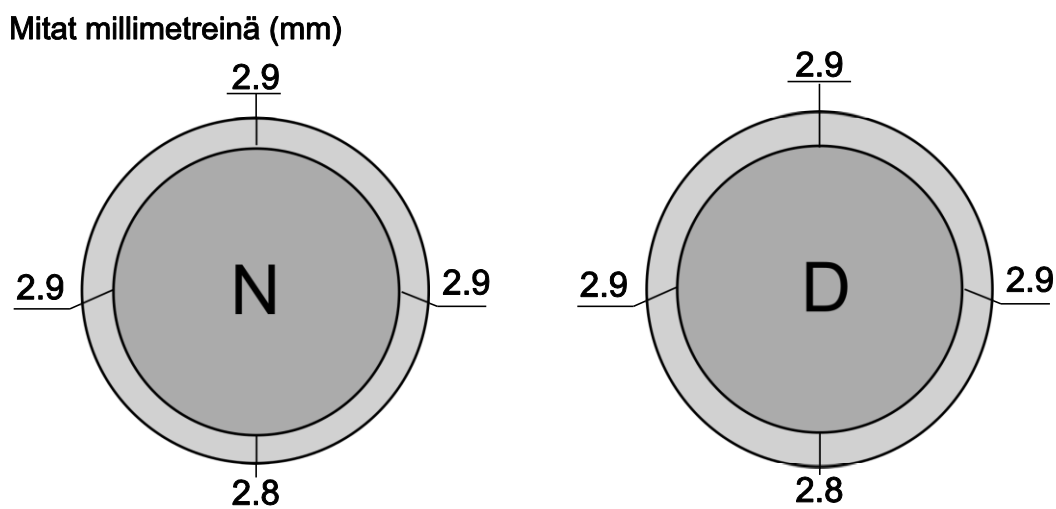
Ensimmäisenä on tehtävä tarkastus, jossa koneen ulkoinen kunto, sekä asennuksen kiinnitykset tarkastetaan. Tarkastettiin, että koneessa ei ole selkeitä ulkoisia vaurioita taikka laitteistoon kuulumattomia osia koneen läheisyydessä, jotka voisivat vahingoittaa laitteistoa koestuksen aikana. Varmistettiin, että kone ja siihen liitetyt laitteet ovat tukevasti kiinnitettynä, eivätkä pääse liikkumaan pyörimyksen aikana. Laitteistoon liitetyt mittaus- ja syöttöjohtimet kiinnitettiin tukeviksi nipuiksi ja kiristettiin siten, että koneen läheisyyteen ei jää ylimääräistä löysää johdinta, joka saattaisi ilmavirtauksen vaikutuksesta heilahtaa pyöriviin osiin.

Silmämääräisessä tarkastuksessa koneesta tai laitteistosta ei löydetty puutteita, jotka olisivat vaikuttaneet mittausten suorittamiseen.

### 5.3.2 Ilmavälin tarkastus

Koneen ilmaväli tarkastettiin mittaamalla roottorin ja staattorin välille jäänyt tila rakotulkilla. Rakotulkki on eripaksuisista peltisiivuista koostuva viuhka, joita yhdistelemällä saadaan aikaan halutunpaksuisia sovituspeltejä. Rakotulkilla mitattiin ilmaväliä koneen asennuksen yhteydessä ja ilmaväli säädettiin mahdollisimman tarkasti lähelle sen suunniteltua arvoa. Ilmavälin tulisi olla mahdollisimman yhdenmuotoinen joka kohdasta, jotta koneen vuo pysyisi symmetrisenä. Ilmaväli ei saa olla liian pieni mistään kohdasta, sillä pyörivän roottorin kontakti staattoriin saattaisi aiheuttaa vakavia vaurioita.

Ilmaväli mitattiin tarkasti neljästä tarkistuspisteestä koneen molemmin puolin ja loppu ilmavälistä käytiin läpi karkeammin rakotulkin kanssa. Mitatut tarkistuspisteiden arvot ovat esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Magnetointikoneen ilmavälit asennuksen jälkeen



### 5.3.3 Eristysvastusmittaus

Staattori- ja roottorikämmien eristysvastukset mitattiin koestusta ennen ja koestuksen jälkeen. Eristysvastusmittaukset tehtiin koneen kämmien ja koneen rungon väliltä 1000 voltin tasajännitteellä. Tällä pyrittiin varmistamaan, että kämmien eristeet ovat kunnossa eikä koneessa synny oikosulkuja, kun konetta magnetoidaan. Mitatut eristysvastukset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Magnetointikoneen eristysvastusmittaukset

Eristysvastus:	Staattori (GΩ)	Roottori (GΩ)
Ennen kokeita	128	109
Kokeiden jälkeen	170	164

ABB:n koekentän koestusohjeiden mukaan raja-arvona eristysvastukselle on 1 GΩ, joten koneen eristeiden voidaan olettaa olevan hyvässä kunnossa.

### 5.3.4 Kylmävastusmittaukset

Koneen kämmien vastukset mitattiin vaiheiden väliltä tarkalla vastusmittarilla. Vastusmittauksilla haluttiin varmistaa, että koneen kämmien vastukset vastaavat suunniteltuja arvoja. Magnetointikoneen mitatut ja A045-ohjelmalla lasketut kylmävastusarvot ovat esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Magnetointikoneen lasketut ja mitatut kylmävastusarvot

	Roottori U-V (Ω)	Roottori U-W (Ω)	Roottori V-W (Ω)	Staattori (Ω)
Laskettu vastus @20°C	0,017780	0,017780	0,017780	5,725
Mitattu vastus @20°C	0,018065	0,018086	0,018069	5,185

Mitatut arvot vastaavat hyvin laskettuja arvoja, eikä vaiheiden välisissä vastuksissa ole merkittäviä eroja. Kone kelpaa koestettavaksi kylmävastusarvojen puolesta.

### 5.3.5 Tyristorisillan tyristorien tarkastaminen

Tällaisia mittauksia ei tyypillisesti tehdä koekentällä, mutta koska kyseessä on erikoiskoestus ja käytettävää siltaa on jouduttu muokkaamaan koestuksia varten, oli tyristorien toiminnan tarkastaminen tarpeellista. Tyristorien toiminta tarkastettiin siten, että tyristorien yli asetettiin yleismittari mittaamaan diodin kynnysjännitettä jonka jälkeen tyristoreille annettiin sytytyspulssi.

Ennen pulssin antamista yleismittari näytti tyristorien olevan estotilassa. Sytytyspulssin ollessa päällä näyttivät tyristorit noin 0,96 voltin kynnysjännitettä. Näin saatiin todettua tyristorien siirtyvän johtavaan tilaan sytytyspulssin saatuaan.

### 5.3.6 Laakeriajo

Ensimmäistä kertaa konetta pyörittäessä on syytä varmistaa koneen laakerien kunto ja roottorin esteetön pyöriminen.

Konetta pyöritettiin aluksi pienellä nopeudella, jonka jälkeen siirryttiin vähän kerrallaan kohti nimellisnopeutta tarkkaillen jatkuvasti mahdollisia tärinöitä taikka hankausääniä. Koneen laakereille kytkettiin pysty- ja vaaka-suuntaisesti tärinäsensorit, joita tarkkailtiin ajon ajan. Sensorit näyttivät tärinöiden suuruudeksi nimellisnopeudella noin 0,5 mm/s, eikä koneesta kuulunut ajon aikana ylimääräisiä ääniä.

### 5.3.7 Tyhjäkäynti- ja oikosulkupiste

Konetta pyöritettiin nimellisnopeudella ja se magnetoitiin sekä nimelliseen tyhjäkäynti- että oikosulkupisteeseen. Tällä kokeella varmistettiin, että kone magnetoituu odotetulla tavalla tarkastamalla magnetointivirta molemmissa mittapisteissä ja vertaamalla sitä laskennasta saatuihin arvoihin.

## 5.4 Parametrien määrittämiseksi suoritettut kokeet

Kun valmistelevat mittaukset oli suoritettu ja kone oli hyväksytty koestusta varten, laitteistolle suoritettiin sarja kokeita, joiden tulosten pohjalta oli tarkoitus määrittää koneen aikavakioita ja reaktansseja. Ensisijaisesti haluttiin toteuttaa kokeet, joita on käsitelty kolmannessa luvussa. Simuloiduista kokeista jännitteen heräämistä ei pystytty toteuttamaan tyristorisillan toiminnan takia. Tyristorien toiminnasta johtuen konetta ei saatu ohjattua oikosulusta tyhjäkäyntiin, jota jännitteen heräämiskoe olisi vaatinut. Muut simuloidut kokeet pystyttiin toteuttamaan suunnitellusti. Kaikki kokeet suoritettiin sekä koneelle jossa kestopagneettinapa oli magnetoimatta että koneelle, jossa napa oli magnetoitu.

Kokeita tehtäessä havaittiin, että staattorin magnetoinnin lisääminen vaikutti koneen pyörimisnopeuteen hidastavasti. Vastaavasti kun kone oli nimellisessä tyhjäkäynti- tai oikosulkupisteessä johti magnetoinnin katkaiseminen pyörimisnopeuden nousuun. Pyörimisnopeuden muutos oli kuitenkin niin hidas kokeiden kestoon nähden, että sen vaikutus tuloksiin voidaan olettaa pieneksi. Pyörimisnopeuden vaikutuksia tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 5.5.

Kokeet, joissa tallennettiin käyrämuotoja oskilloskoopille, suoritettiin kolmeen kertaan. Tällä haluttiin varmistaa, että yksittäinen mittausvirhe ei pääse pilaamaan tuloksia.

### 5.4.1 Tyhjäkäynti- ja oikosulkukäyrät

Tyhjäkäynti- ja oikosulkukäyrät määritettiin magnetoimalla kone aluksi hieman nimellispisteen yli ja tämän jälkeen laskemalla magnetointi portaittain alas. Staattorin virta/jännite, sekä magnetointivirta kirjattiin joka askeleella. Tässä kokeessa jännite- ja virta-arvot luettiin oskilloskoopin ja jännitesäätäjän näytöiltä. Varsinkin ylimmissä mittapisteissä jännitesäätäjän oma mittaus heittelehti huomattavasti ja tämä aiheuttaa

mittauksiin merkittävän mittaajan tulkinnasta aiheutuvan virheen. Tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina.

Käyristä voidaan määrittää koneen tahtireaktanssi  $X_d$ . (IEC 60034-4 2008)

$$X_d = \frac{U_N}{I_K \sqrt{3}} \quad (23)$$

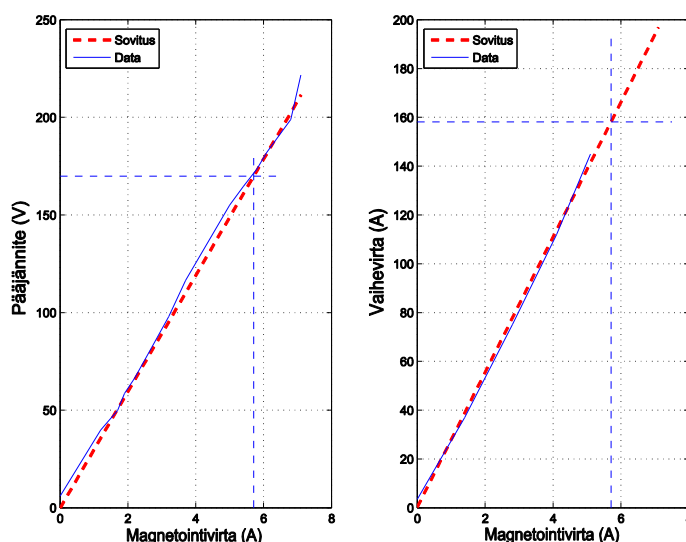
Missä  $I_K$  on koneen oikosulkuvirta sillä magnetoinnin arvolla, jolla tyhjäkäyntijännite on nimellinen.

Kuvassa 16 on esitetty koneen tyhjäkäynti- ja oikosulkukäyrät koneen kestopagneetin ollessa magnetoimatta. Kuvissa on esitetty sekä käyrien alkuperäinen data että niiden pohjalta tehdyt käyräsovitukset. Koska tyhjäkäyntikäyrä on tässä tapauksessa hyvin lineaarinen, sovitettiin ilmvälisuora koko tyhjäkäyntikäyrän dataan. Sovitettu ilmvälisuora on lisäksi IEC standardin mukaisesti siirretty alkamaan origosta. Taulukossa 13 on esitetty kaavasta 23 ja kuvasta 17 ratkaistut reaktanssit magnetoimattomalla ja magnetoidulla navalla.

Kuvasta 16 saadaan kaavassa 23 tarvittava arvo  $I_K$  katsomalla tyhjäkäyntikäyrän nimellisjännitteen magnetoituvirta ja tällä magnetoinnilla syntyvä virta oikosulkukäyrästä.

Taulukko 13. Käyristä määritetyt tahtireaktanssit

	$X_d(\Omega)$	$X_d(\text{p. u.})$
PM magnetoimatta	0.6202	0.9740
PM magnetoituna	0.6344	0.9688



Kuva 16. Tyhjäkäynti- ja oikosulkukäyrät koneelle jonka kestopagneetinapa on magnetoimatta.

### 5.4.2 Tyhjäkäyntijännitteen vaimeneminen

Tyhjäkäyntijännitteen vaimeneminen mitattiin ajamalla kone nimelliseen tyhjäkäyntipisteeseen, jonka jälkeen magnetointi katkaistiin äkillisesti. Oskilloskooppi aseteltiin mittaamaan kymmenen sekunnin mittaista ajanjaksoa, sekä tallentamaan roottorin vaihejännitteet että staattorin jännite ja virta. Vaimenemisen käyrämuoto tallennettiin siten, että datan alkupäähän jäi muutama sekunti tasaista nimellistilaa ja muutosilmiön jälkeen jännitteelle jäi riittävästi aikaa asettua lopulliseen arvoonsa. Taulukossa 14 esitetään mitatuista käyrämuodoista määritetyt tyhjäkäyntijännitteen vaimenemisen parametrit  $\tau'_{d0}$ . Määrittäminen on tehty kuten luvussa 4.2.

Taulukko 14. Magnetointikoneen mittauksista määritetyt tyhjäkäyntiaikavakiot

	$\tau'_{d0}(s)$ , PM magnetoimatta	$\tau'_{d0}(s)$ , PM magnetoitu
Koe 1	0.3702	0.3680
Koe 2	0.3745	0.3710
Koe 3	0.3710	0.3720
<b>Keskiarvo</b>	<b>0.3719</b>	<b>0.3703</b>

### 5.4.3 Oikosulkuvirran vaimeneminen

Oikosulkuvirran vaimenemisessa kone ajettiin nimelliseen oikosulkupisteeseen. Tämän jälkeen magnetointi katkaistiin äkillisesti. Datatallennus toteutettiin samalla tavoin kuin jännitteen vaimenemiselle. Mitatuista käyrämuodoista määritetään oikosulkuaikavakiot  $\tau'_d$ , jotka ovat esitetty taulukossa 15. Määrittäminen on tehty kuten luvussa 4.2.

Taulukko 15. Magnetointikoneen mittauksista määritetyt oikosulkuaikavakiot

	$\tau'_d(s)$ , PM magnetoimatta	$\tau'_d(s)$ , PM magnetoitu
Koe 1	0.1850	0.1830
Koe 2	0.1843	0.1765
Koe 3	0.1861	0.1765
<b>Keskiarvo</b>	<b>0.1851</b>	<b>0.1787</b>

### 5.4.4 Sysäysoikosulkukoe

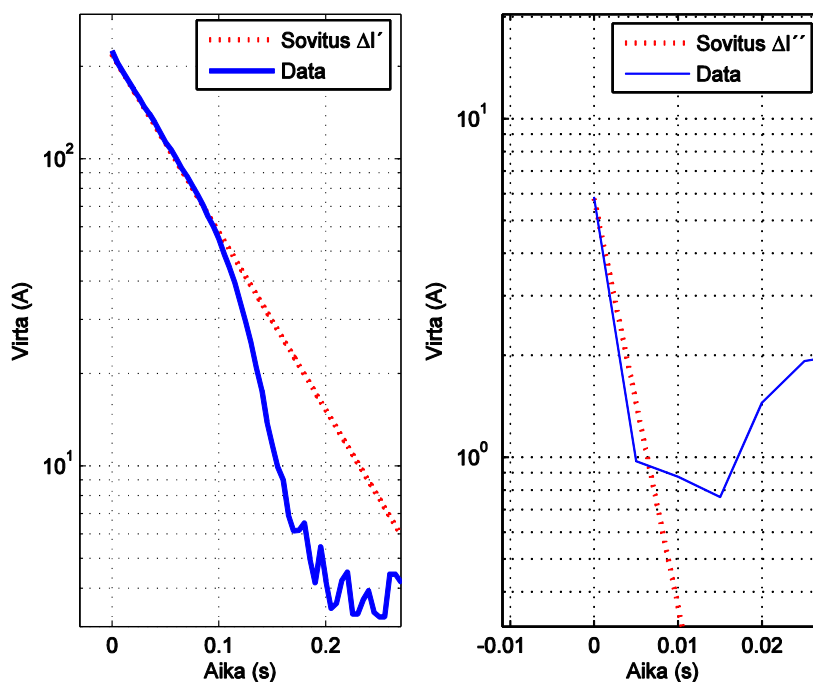
Sysäysoikosulkukoe suoritettiin ajamalla kone nimellistyhjäkäyntipisteeseensä ja tämän jälkeen tyristorisillan tyristoreille annettiin sytytyspulssi, joka ohjasi koneen roottorin oikosulkuun. Syntyneet virtamuodot tallennettiin kuten vaimenemiskokeissa. Sysäysoikosulkukoe tehtiin myös kahdesti nimellisipisteestä poikkeavalla jännitteellä: puolella nimellisjännitteellä ja puolitoistakertaisella nimellisjännitteellä.

Sysäysoikosulkukokeen vaikutusta koneen magnetoituun kestopagneettinapaan tarkkailtiin tarkastelemalla koneen remanenssijännitettä nimellisuopeudella. Kestomagneettinavan alkumagnetoinnin jälkeen oli koneen remanenssijännite noin 9,2 voltia. Koneelle tehtiin tämän jälkeen kolme sysäysoikosulkukokeita, joista kaksi

nimellisjännitteellä ja yksi puolitoistakertaisella nimellisjännitteellä. Remanenssijännite ei muuttunut havaittavasti kokeiden vaikutuksesta.

Ensimmäinen sysäysoikosulkukoe tehtiin aluksi alennetulla jännitteellä kestopagneettinapa magnetoimatta, koska haluttiin varmistaa, että kokeen aikana syntyvä vääntömomenttipiikki ei aiheuta vaaraa laitteiston rakenteille ja kiinnityksille (Pärssinen 2005). Syntyvän momentin vaikutusta arvioitiin seuraamalla pyörityslaitteen pyörimisnopeuden käyttäytymistä roottorin oikosulkuun kytkemisen jälkeen. Alennetulla jännitteellä tehdyssä kokeessa ei havaittu suurta muutosta pyörimisnopeudessa, joten siirryimme nimellisjännitteellä tehtäviin sysäysoikosulkukokeisiin. Sysäysoikosulkukoe nimellisjännitteellä suoritettiin koneelle kolme kertaa kun kestopagneettinapa oli magnetoimatta ja kaksi kertaa kun napa oli magnetoitu. Lopuksi koe suoritettiin vielä magnetoidulla navalla puolitoistakertaisella nimellisjännitteellä.

Saatu mittaustiedot analysoitiin samalla tavoin kuin simuloitu data ja parametrit määritettiin kuten luvussa 4.1.1. Mitattua dataa analysoitaessa huomattiin, että mitatut käyrämuodot poikkesivat niitä vastaavista simuloituista tuloksista. Tästä johtuen simulaatiodatan analysoinnissa käytettyjä Matlab funktioita jouduttiin muokkaamaan. Simulaatiodatalle IEC standardin mukaiset käyräsovitukset suoritettiin luvun 4.1.1 kohdan a) mukaisesti. Mitatulle datalle sovitukset suoritettiin kohdan b) mukaisesti, jossa virran verhoikäyrän malli on puolilogaritmisessa koordinaatistossa kaareva, eikä suora kuten simuloitu data. Lisäksi simulaatioista poiketen mitatulla datalla ei esiinny juuri lainkaan nopeaa muutosaikeavakioita  $\tau_d''$ , kuten voidaan nähdä kuvasta 17. Tästä johtuen tämä aikavakio ja sitä vastaava reaktanssi  $X_d''$  jätetään huomiotta. Mittaustiedosta IEC standardin mukaan määritetyt parametrit  $X_d'$  ja  $\tau_d'$  esitetään taulukoissa 18 ja 20.



Kuva 17. IEC standardin mukainen parametrien määrittäminen mitatusta sysäysoikosulkukokeesta

Taulukoiden 17 ja 19 parametrit on laskettu kuten luvussa 4.1.1. Mittadatasta määritetään rms arvot alkutilan jännitteelle  $U_0$  Matlabin avulla. Kokeita tehdessä kone magnetoitiin mahdollisimman lähelle nimellisjännitettä 169,9 voltia. Taulukoista 16 ja 18 nähdään, että jännite on ollut hyvin lähellä haluttua arvoa ennen sysäysoikosulkukokeen oikosulkuun ohjausta.

**Taulukko 16. Magnetoimattomalla kestopagneetilla sysäysoikosulkukokeesta IEC:n mukaisesti määritetyt arvot, joiden avulla lasketaan halutut parametrit**

	p1'	p2'	$U_0$ (V)	$I_\infty$ (A)
Koe 1	195,0448	13,8313	171,98	221
Koe 2	212,3733	14,0056	171,61	220
Koe 3	202,3995	17,7427	171,22	219

**Taulukko 17. Taulukon 17 mukaan määritetyt parametrit**

	$X'_d$ ( $\Omega$ )	$X'_d$ (p.u.)	$\tau'_d$ (s)
Koe 1	0,3369	0,5145	0,0723
Koe 2	0,3242	0,4951	0,0714
Koe 3	0,3317	0,5065	0,0564
<b>Keskiarvo</b>	<b>0,3309</b>	<b>0,5054</b>	<b>0,0667</b>

Taulukon 17 kolmannen kokeen  $\tau'_d$  arvo poikkeaa muiden kokeiden arvosta ja siksi tuloksen huomioiminen keskiarvossa on kyseenalaista. Suuremmalla koemäärällä voitaisiin paremmin sanoa poikkeako kokeen 3 tulos selvästi yleisestä linjasta.

**Taulukko 18. Sysäysoikosulkukokeen mittauksista saadut IEC standardin mukaisesti määritetyt parametrit kun koneen kestopagneetti oli magnetoituna**

	p1'	p2'	$U_0$ (V)	$I_\infty$ (A)
Koe 1	190,4858	13,0716	172,94	221
Koe 2	216,371	13,5474	173,09	221

**Taulukko 19. Taulukon 19 mukaan määritetyt parametrit**

	$X'_d$ ( $\Omega$ )	$X'_d$ (p.u.)	$\tau'_d$ (s)
Koe 1	0,3430	0,5238	0,0765
Koe 2	0,3329	0,5083	0,0752
<b>Keskiarvo</b>	<b>0,3380</b>	<b>0,5161</b>	<b>0,0758</b>

Seuraavat käyräsovituksella saadut tulokset on määritetty kuten kappaleessa 4.1.2. Taulukoissa 20 ja 21 esitetään Matlabilla eri sysäysoikosulkukokeista käyräsovituksella määritetyt parametrit. Taulukoista nähdään vaiheiden väliset vaihtelut parametreissa ja niistä lasketut keskiarvot. Tulokset on esitetty tilanteessa, jossa kestopagneettinapa on magnetoimatta, sekä tilanteessa jossa napa on magnetoitu. Lisäksi liitteessä A on esitetty ali- ja ylijännitteellä tehdyistä kokeista saadut parametrit omissa taulukoissaan.

Mittausdatan sovitus tehtiin huomattavasti pienempään datajoukkoon kuin simuloinneissa. Sovitus tehtiin 20000 näytteen suuruiseen osaan mitatusta vaihevirrasta, mikä vastaa 50000 hertsin näytteenottotaajuudella 0,4 sekunnin ajanjaksoa. Syy tähän on mittaussignaalin muuttuvassa taajuudessa, joka lisää sovituksen virhettä sovitusalueen kasvaessa. Virhettä käydään läpi tarkemmin luvussa 5.5.2.

**Taulukko 20. Sysäysoikosulusta käyräsovituksen avulla määritetyt parametrit kun kestopagneetti on magnetoimatta**

<b>Koe 1</b>	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X'''_d(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,6481	0,3175	0,2149	0,2455	0,0872	0,0163
$I_b$	0,6948	0,3474	0,5434	0,2122	0,0906	0,0004
$I_c$	0,6938	0,3471	0,3207	0,3942	0,0927	0,0141
Keskiarvo	0,6789	0,3373	0,3597	0,2840	0,0902	0,0103
p.u.	1,0366	0,5151	0,5492	0,4336		
<b>Koe 2</b>	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X'''_d(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,6658	0,3288	0,3986	0,5282	0,0945	0,0122
$I_b$	0,7127	0,3475	0,2877	0,3358	0,0921	0,0156
$I_c$	0,708	0,3467	0,1043	0,1087	0,0921	0,0183
Keskiarvo	0,6955	0,341	0,2635	0,3242	0,0929	0,0154
p.u.	1,0620	0,5207	0,4024	0,4951		
<b>Koe 3</b>	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X'''_d(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,6674	0,3316	0,5674	0,2147	0,0992	0,0003
$I_b$	0,7117	0,3541	0,3332	0,4105	0,0973	0,0141
$I_c$	0,7042	0,3441	0,2547	0,2924	0,0925	0,0161
Keskiarvo	0,6944	0,3433	0,3851	0,3059	0,0963	0,0102
p.u.	1,0604	0,5242	0,5880	0,4670		
<b>Keskiarvo</b>	<b>0,6896</b>	<b>0,3405</b>	<b>0,3361</b>	<b>0,3047</b>	<b>0,0931</b>	<b>0,0119</b>
<b>p.u.</b>	<b>1,0530</b>	<b>0,5200</b>	<b>0,5132</b>	<b>0,4652</b>		

**Taulukko 21. Sysäysoikosulusta määritetyt parametrit kun kestopagneetti on magnetoitu**

<b>Koe 1</b>	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X'''_d(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,6625	0,3238	0,293	0,3644	0,0977	0,0145
$I_b$	0,7083	0,3481	0,2155	0,2392	0,0976	0,0167
$I_c$	0,7064	0,3464	0,4888	0,2041	0,0988	0,0005
Keskiarvo	0,6924	0,3394	0,3324	0,2692	0,0980	0,0106
p.u.	1,0573	0,5183	0,5076	0,4111		
<b>Koe 2</b>	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X'''_d(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,6899	0,3283	0,4734	0,2106	0,1089	0,0004
$I_b$	0,7398	0,3521	0,331	0,4104	0,1093	0,0143
$I_c$	0,7262	0,342	0,2355	0,2689	0,1021	0,0163
Keskiarvo	0,7186	0,3408	0,3466	0,2966	0,1068	0,0103
p.u.	1,0973	0,5204	0,5293	0,4529		
<b>Keskiarvo</b>	<b>0,7055</b>	<b>0,3401</b>	<b>0,3395</b>	<b>0,2829</b>	<b>0,1024</b>	<b>0,0105</b>
<b>p.u.</b>	<b>1,0773</b>	<b>0,5193</b>	<b>0,5185</b>	<b>0,4320</b>		

## 5.5 Virhetarkastelu

Mittauksessa käytettyjen kierrettyjen kuparikaapeleiden yli syntyy pieni jännitehäviö. Käytetyt kaapelit olivat pituudeltaan kuitenkin vain noin viisitoista metrisiä ja niiden poikkipinta-ala oli puolitoista neliömillimetriä. Näin ollen niistä syntyvä vastus mittalaitteen sisäiseen vastukseen nähden on hyvin pieni ja näin ollen jännitteen jaon periaatteen mukaisesti johtimien yli syntyvä jännitehäviö on pieni. Oletetaan mittalaitteistosta ja mittakaapeleista johtuvat virheet merkityksettömiksi.

Mittauksissa käytetty näytteenottotaajuus oli viisikymmentä kilohertsiä, mikä tarkoittaa koneen nimellistaajuudella noin 235 näytettä signaalin jaksoa kohden. Tämä vastaa hyvin simulaatioissa käytettyä näytteenottotaajuutta, joka oli 200 näytettä jaksoa kohti.

Kokeet suoritettiin useaan kertaan, jotta mahdolliset epäonnistuneet mittaustulokset voitaisiin havaita ja jättää huomiotta. Jokainen koe suoritettiin kolmeen kertaan, paitsi sysäyskoskuskoe nimellisjännitteellä kestopagneetti magnetoituna, joka suoritettiin vain kahdesti. Saman kokeen toistetuista mittauksista otettiin lopuksi keskiarvo. Kasvattamalla toistettujen kokeiden määrää olisi tulosten luotettavuutta ja tarkkuutta mahdollista parantaa. Tämän työn aikataulun puitteissa tämä ei ollut kuitenkaan mahdollista.

### 5.5.1 Virhelähteet IEC standardin mukaisissa määrityksissä

Kappaleessa 5.4.1 määritettiin magnetointikoneelle oikosulku- ja tyhjäkäyntikäyrät. Näiden käyrien tuloksia voidaan pitää suuntaa-antavina, sillä mittausten data kirjattiin manuaalisesti. Magnetointikoneen kolmivaihekäämin jännite ja virta luettiin mittalaitteena käytetyn oskilloskoopin näytöltä ja staattorin vastaavan hetken virta otettiin Unitrol-jännitesäätäjän tietokoneelle asennetun ohjausohjelmiston digitaaliselta virtanäytöltä. Unitrol-ohjelmiston digitaalisen näytön arvot heittelivät sitä enemmän, mitä suuremmalla virralla staattoria magnetoitiin ja tästä johtuen varsinkin käyrien ylimmät pisteet ovat tarkkuudeltaan heikkoja.

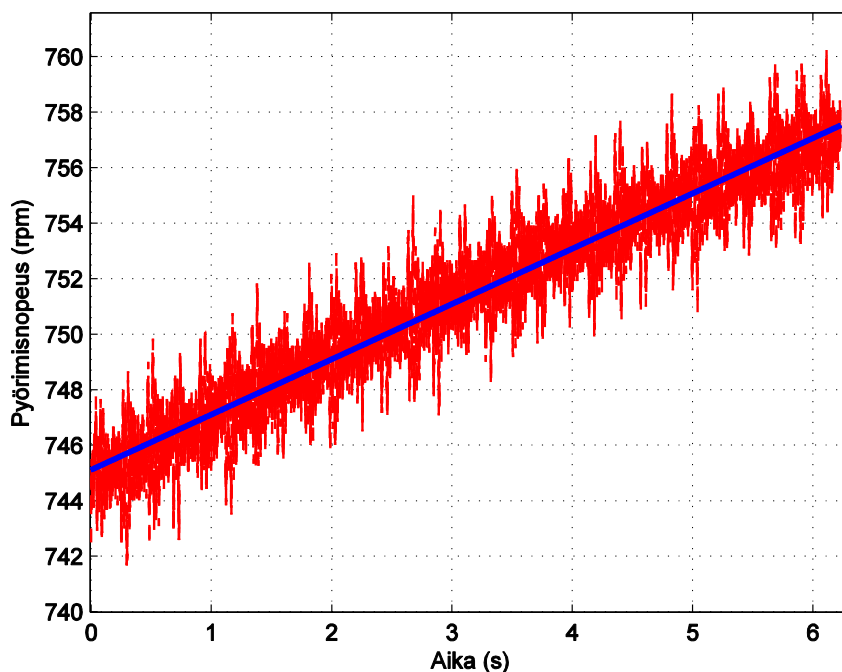
Mittausdatasta saatuja muita IEC standardin mukaan määritettyjä parametreja koskee pääasiassa samat ongelmat kuin simulaatioista saatuja parametreja.

Mitattujen kokeiden yhteydessä virhettä tuloksiin aiheuttaa kuitenkin mittauksien aikana tapahtunut koelaitteen pyörimisnopeuden muutos ja pyörimisnopeuden asettelun epätarkkuus. Nopeuden muutokset mitatuissa kymmenen sekunnin aikaikkunoissa olivat suurimmillaan noin viisitoista kierrosta minuutissa. Mitatut muutosilmiöt olivat kuitenkin maksimissaan vain muutaman sekunnin kestoisia, joten nopeuden muutos analysoitavan datan alueella jäi pieneksi. Pyörimisnopeuden asettelun epätarkkuudesta huolimatta päästiin kokeissa hyvin lähelle nimellisnopeutta. Pyörimisnopeuden muutos oikosulkuvirran vaimenemiskokeessa on esitetty kuvassa 18.

Oikosulkuvirran vaimeneminen oli hyvin nopea muutosilmiö, jonka virrat siirtyivät alkutilasta tasaantuneeseen tilaan alle sekunnissa. Kuvasta 18 voidaan nähdä, että pyörimisnopeuden muutos on noin yksi kierros sekunnissa. Pyörimisnopeuden



poikkeama oletetusta nimellisnopeudesta ja pyörimisnopeuden muutoksen aiheuttama vääristymä jää muutosilmiön aikana hyvin pieneksi.



Kuva 18. Pyörimisnopeuden muutos erään oikosulkuvirran vaimenemiskokeen mittauksen aikana

### 5.5.2 Sysäysoikosulun käyränsovituksessa syntyvät virheet

Muuttuva pyörimisnopeus vaikuttaa haitallisesti myös käyränsovitukseen onnistumiseen. Sovituksessa käytetty kaavan 17 mukainen malli pätee vain taajuuden pysyessä vakiona. Tehdyissä kokeissa mittausdatassa tapahtuva pyörimisnopeuden muutos on huomattavissa, mutta sen muutos käsiteltävän datan aikana on suhteessa nimellisnopeuteen pieni. Tällä perusteella voidaan olettaa pyörimisnopeudesta johtuvan taajuuden muutoksen vaikuttavan tuloksiin hyvin vähän.

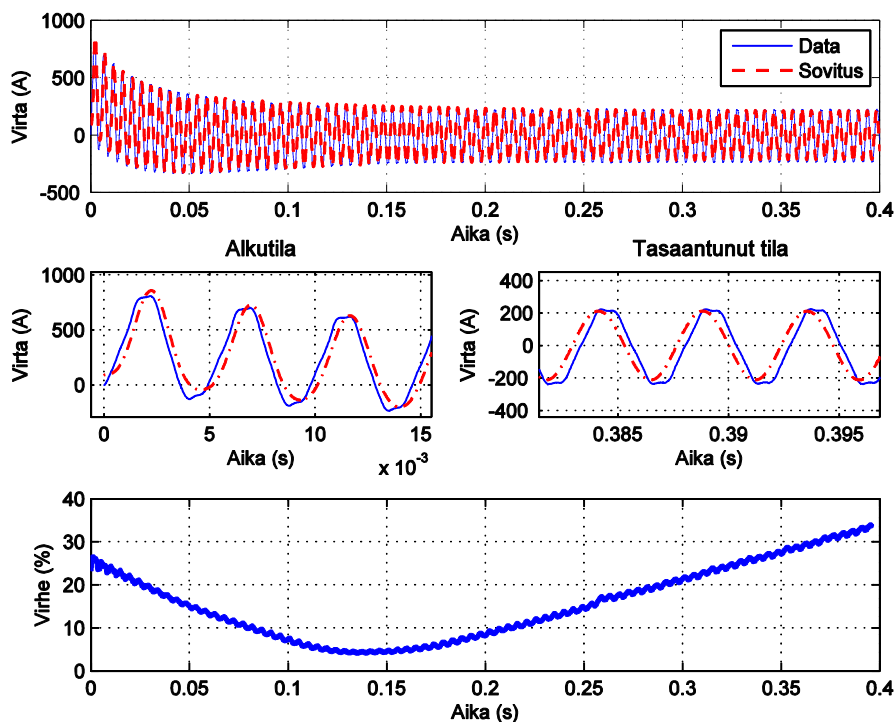
Muuttuvaa taajuutta pyrittiin mukailemaan antamalla sovittavalle kaavalle 17 koneen sähköinen taajuus  $f$  vektorimuodossa. Taajuusvektori ratkaistiin mitatusta pyörimisnopeuden datasta sovittamalla siihen suoran yhtälö ja asettamalla saatu suora kuvaamaan pyörimisnopeutta yhtälöön 1.

Simulaatioista poiketen käyränsovitus tehtiin mitatulla datalla ajallisesti lyhyemmälle jaksolle kuin simulaatioissa, koska transientti tilan parametrit vääristyivät, jos pysyvän tilan osuus datasta oli selvästi muuttuvaa tilaa pidempi. Virhekäyrät ratkaistiin kuitenkin samaan tapaan kuin simulaatioiden yhteydessä kaavan 21 mukaisesti.

Kuvassa 19 on esitetty yhden vaiheen virta ja virrälle tehty sovitus oikosulkuiskussa, jonka aikana kestopagneettina oli magnetoituna. Kuvasta nähdään, että sovitus on selkeästi huonompi kuin simulaatiolle tehdyille sovitukselle, joka esitettiin kappaleessa 4.1.2. Muuttuvasta taajuudesta johtuen sovituksen istuvuus muuttuu myös aikajanan suunnassa, mitä ei esiintynyt simulaation yhteydessä. Tähän pyrittiin varautumaan

antamalla sovitukselle koneen pyörimisnopeuden datasta sovittamalla ratkaistu taajuus vektorimuodossa. Tästä huolimatta käytetty taajuusvektori ei ollut kovin tarkka.

Sovituksen virhe on selvästi suurilta osin seurausta käyräsovituksessa käytetyn taajuuden virheestä. Kuvan 19 tarkennuksista nähdään, miten sovitettu käyrä on alkutilanteessa mitattua dataa jäljessä, mutta on tasaantuneessa tilassa siirtynyt mittaustiedon edelle. Virhekäyrän mukaan sovitusta on parhaimmillaan lähellä ajanhetkeä 0,15 sekuntia, mikä on transienttitalan loppupuolella. Tämä virheikäyrä ei kuvaa yhtä hyvin reaktansseissa esiintyvää virhettä kuin simulaatioiden tapauksessa, koska virhe koostuu suurelta osin aikatazon siirtymästä ja reaktanssit määräytyvät pääasiassa virran amplitudista. Aikatazon siirtymä vaikuttaa aikavakioihin, mutta siirtymän ollessa analysoidun datan aikana varsin pientä, voidaan aikavakioihin syntynyt virhe olettaa pieneksi. Virheikäyrästä voidaan nähdä, että taajuustasossa oleva virhe kasvaa minimikohtansa jälkeen hyvin lineaarisesti. Tämä viittaisi tarpeeseen parantaa sovituksessa käytettävää taajuuden esitystä.



Kuva 19. Mitatulle datalle tehty käyräsovitus ja sovitusvirhe, kun koneen kestopagneettinapa on magnetoituna

## 6 Tulosten tarkastelu ja hyödyntäminen

Tässä luvussa tarkastellaan työstä saatuja tuloksia sekä pohditaan tulosten sovellutuksia että aiheeseen liittyviä mahdollisia jatkotutkimuksia. Simuloimalla saatuja parametreja vertaillaan analyttisen A045-ohjelman tuloksiin ja mittauksista saatuihin tuloksiin. Parametreissa esiintyvien poikkeamien syitä tarkastellaan ja parannusehdotuksia esitetään. Kestomagneettinavan vaikutusta koneen toimintaan tarkastellaan simulaatio- ja mittautulosten pohjalta.

### 6.1 Parametrien ja mitattujen käyrämuotojen tarkastelu

Tässä työssä magnetointikoneen sähköisiä parametreja on määritetty magnetointikoneen staattorin kestomagneettinavan eri tiloissa. Vertailtavuuden ja tulosten suurten määrän takia, parametrien välinen tarkastelu rajataan tilanteeseen, jossa staattorin kestomagneettinapa on magnetoituna. Tämä on tila, jossa magnetointikoneetta tyypillisesti käytetään. Tarkasteltavat parametrit ovat esitettynä taulukossa 22. Taulukossa esitetään: ABB Oy:n magnetointikoneille käyttämän A045-ohjelman tuottamat parametrien laskennalliset arvot, FCSMEK simulaatioista määritetyt parametrit, sekä tehdyistä mittauksista määritetyt parametrit.

Kestomagneettinavan vaikutusta saatuihin parametreihin tarkastellaan myöhemmin kappaleessa 6.2.

**Taulukko 22. Laskennalliset ja määritetyt parametrit magnetointikoneelle, jonka kestomagneettinapa on magnetoitu**

	$X_d$ (p.u.)	$X'_d$ (p.u.)	$X''_d$ (p.u.)	$X''_q$ (p.u.)	$\tau'_{d0}$ (s)	$\tau'_d$ (s)	$\tau''_d$ (s)
<b>Laskennalliset arvot:</b>							
A045	0,9365	0,5228	0,5228	0,4209	0,1995	0,0940	-
<b>Simulaatiot:</b>							
I ja U vaimeneminen (IEC)	-	-	-	-	0,3726	0,1702	-
U herääminen (IEC)	-	0,5471	0,5436	-	0,38	-	-
Sysäysoikosulku (IEC)	-	0,4902	0,3969	-	-	0,1745	0,023
Käyräsovitus	0,9882	0,4933	0,3501	0,4042	-	0,179	0,0344
<b>Mittaukset:</b>							
Käyrät (IEC)	0,9688	-	-	-	-	-	-
I ja U vaimeneminen (IEC)	-	-	-	-	0,3703	0,1787	-
Sysäysoikosulku (IEC)	-	0,5161	-	-	-	0,0759	-
Käyräsovitus	1,0773	0,5193	0,5185	0,4320	-	0,1024	-

Taulukossa 22 esitetyt reaktanssiarvot vastaavat toisiaan melko hyvällä tarkkuudella. Reaktansseissa suurimmat poikkeamat esiintyvät  $X''_d$  arvojen sysäysoikosulun simulaatiotuloksia verrattaessa laskennallisiin ja mitattuihin arvoihin. Lisäksi sysäysoikosulun mittauksista käyräsovituksella saatu  $X_d$  arvo poikkeaa laskennallisista ja simuloituista tuloksista.  $\tau'_d$  aikavakiossa on poikkeamia vaimenemiskokeista ja sysäysoikosulusta mittauksilla saatujen arvojen välillä. Simulaatioista ja mittauksista

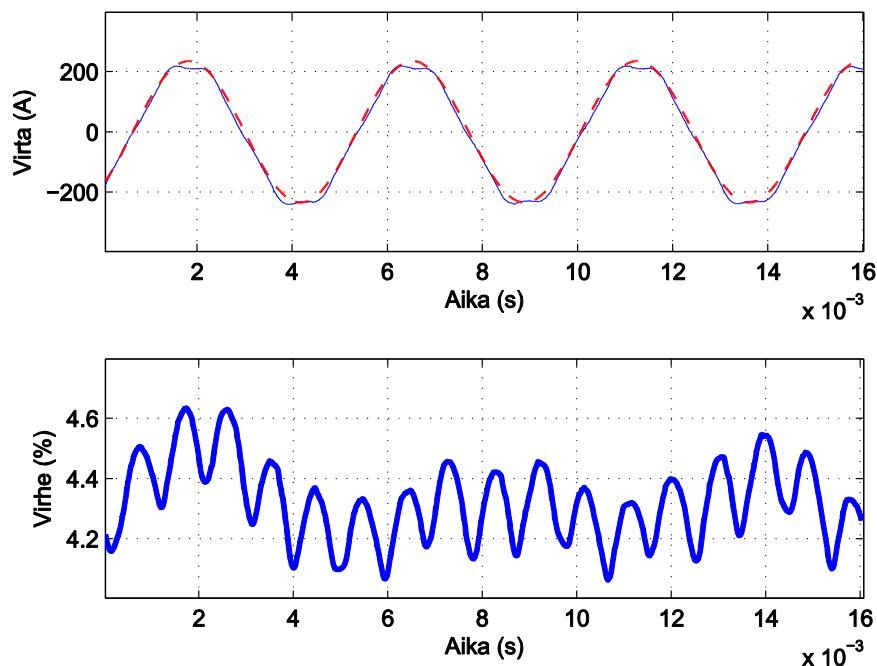
vaimenemiskokeilla saadut aikavakiot  $\tau'_{d0}$  ja  $\tau'_d$  poikkeavat huomattavasti laskennallisista arvoista. Mittausten oikosulkukokeesta määritetyt  $\tau'_d$  arvot ovat kuitenkin selvästi lähempänä laskennallisia arvoja kuin muilla menetelmillä saadut arvot. Tarkastellaan näitä eroavaisuuksia seuraavaksi hieman tarkemmin.

Oikosulku- ja tyhjäkäyntikäyrän mittauksesta määritetty parametri  $X_d$  sisältää mittauksen epätarkkuudesta johtuvaa virhettä, jonka suuruutta on hankala tarkkaan määrittellä. Vertaamalla arvoa simulaatiotulokseen ja laskennalliseen arvoon voidaan kuitenkin olettaa, että mittauksella saatu tulos on lähellä oikeaa suuruusluokkaa. Sysäysoikosulkukokeen mittauksesta käyräsovituksella määritetty vastaava  $X_d$  arvo on muita arvoja jonkin verran suurempi. Tämä voi johtua käyräsovituksen lyhyydestä mittatulosten käsittelyssä syystä, jota on käsitelty kappaleessa 5.5.2. Käyräsovituksen lyhyys aiheuttaa tulosten painottumista transientti-tilan parametreille jatkuvan tilan osuuden sovitettavasta datasta jäädessä lyhyeksi. Tehdään tarkistuksena käyräsovitus datalle, joka sisältää ainoastaan sysäysoikosulkuvaihevirran tasaantunutta osaa sillä oletuksella, että tällä tavoin parametri  $X_d$  määrittyy tarkemmin.

Muokkaamalla Luomin opetusmateriaalista (1998) saatua sysäysoikosulkuvirran yhtälöä 16 saadaan yhtälö, joka kuvaa oikosulkuvirran tasaantunutta tilaa:

$$i_{sa} = -\frac{\hat{u}_{s0}}{X_d} \cos(\omega t + \vartheta_{r0}) \quad (24)$$

Sovitetaan yhtälö 24 tasaantuneen sysäysoikosulkuvirran dataan muutaman verkkojakson pituiselle osalle, jolloin taajuuden muutoksesta syntyvä virhe on pieni. Saadaan kuvan 20 mukainen sovitus ja taulukon 23 mukaiset parametrit.



Kuva 20. Sovitus tasaantuneelle oikosulkuvirralle tarkemman  $X_d$  parametrin saavuttamiseksi

Taulukko 23 Sysäysoikosulkukokeen mittauksen tasaantuneesta tilasta käyräsovituksella määritetyt vaiheiden  $X_d$ -parametrit

	Koe 1, $X_d(\Omega)$	Koe 2, $X_d(\Omega)$
$I_a$	0,5907	0,5863
$I_b$	0,6295	0,6281
$I_c$	0,6284	0,6257
Keskiarvo	0,6162	0,6134
<b>p.u.</b>	<b>0,9409</b>	<b>0,9366</b>

Taulukossa 23 olevista tuloksista nähdään, että sovituksen teko virran tasaantuneelle alueelle muutti selvästi parametrin  $X_d$  suuruutta. Tämä tarkennettu tulos vastaa selvästi paremmin muita taulukon 23  $X_d$ :n arvoja. Muutkin käyräsovituksella ratkaistavat parametrit voitaisiin ratkaista samaan tapaan, kuten on ehdotettu kappaleessa 4.4. Tämän työn puitteissa tätä mahdollisesti tarkempaa menetelmää ei kuitenkaan tarkastella enempää, vaan jätetään se mahdolliseksi jatkokehitykseksi.

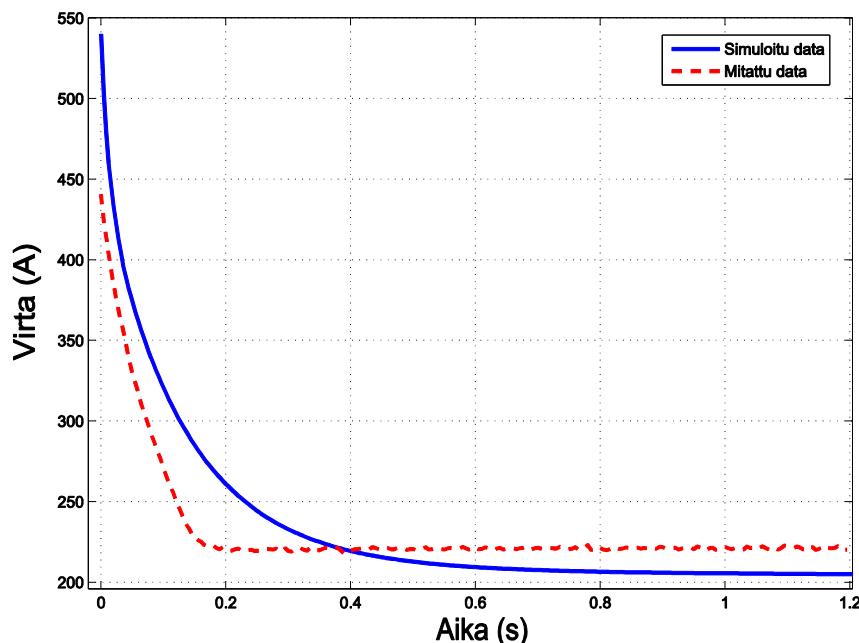
Taulukon 22  $X'_d$  ja  $X''_q$  arvot vastaavat melko hyvin toisiaan, mutta  $X''_d$  arvoissa on poikkeama parametreissa, jotka määritettiin simuloidusta sysäysoikosulkukokeesta. Tarkastelemalla simuloidun jännitteen heräämisen kuvaa 8 huomataan, että käyrän alussa ei esiinny nopeaa muutoskomponenttia, kuten sysäysoikosulun kuvassa 4. Tämä saattaa johtua jännitteen heräämisen käyrämuodon leikkaamisesta, josta puhuttiin luvussa 4.3. Lisäksi sysäysoikosulkukokeen ja jännitteen heräämiskokeen käyrien alkutilojen arvot ovat selvästi erisuuret. Alkutilan virran tai jännitteen arvosta määräytyvä reaktanssi  $X''_d$  on tästä syystä erilainen näiden kokeiden välillä. Myöskään mitatussa sysäysoikosulkukokeen datassa ei nopeita alkutilan muutoskomponentteja esiintynyt. Tämä viittaisi siihen, että simuloidussa sysäysoikosulkukokeessa alkutilan parametrien määrittämisessä on epätarkkuutta.

Tarkastellaan seuraavaksi parametria  $\tau'_d$ , jossa esiintyy selkeästi suurimmat eroavaisuudet simuloitujen ja mitattujen tulosten välillä sysäysoikosulkukokeen yhteydessä. Tutkitaan simuloidun ja mitatun datan parametrien määrittästä hieman tarkemmin  $\tau'_d$  parametrin osalta. Kuvassa 21 esitetään sysäysoikosulkukokeen vaihevirtojen synnyttämät keskimääräiset verhoikäyrät simulaatio- ja mittaustuloksista.

Kuvan 21 käyristä nähdään, että mitattu virta vaimenee huomattavasti nopeammin kuin simuloitu. Mitatun virran vaimeneminen on myös merkittävästi lineaarisempaa. Verhoikäyrien muotoja katsomalla vaikuttaa ymmärrettävältä, miksi oikosulkuiskuista saadut  $\tau'_d$  arvot ovat erisuursuusia simulaation ja mittausten välillä.

Mahdollisia syitä simulaatioiden ja mittausten poikkeaviin käyrämuotoihin ovat:

- mittauksissa käytetty tyristorisilta
- magnetointikoneen vyyhdenpäiden mallinnus simulaatiossa
- mittauksissa magnetointikoneen syöttönä käytetty Unitrol 1000 jännitesäätäjä
- mittauksissa tapahtunut systemaattinen virhe
- ero mitatun ja simuloidun koneen ilmapäleissä



Kuva 21. Verhokäyrät mitatussa ja simuloitussa sysäysoikosulussa

Tyristorisiltaa ei ole huomioitu simulaatioissa lainkaan, mutta todellisissa mittauksissa sillä saattaa olla vaikutusta koneen sähköiseen käyttäytymiseen tasasuuntaussillassa syntyvän kommutointireaktanssin johdosta (Rasilo 2007, s. 15). Vyyhdenpäitä ei ole mallinnettu simulaatioissa, mutta niiden induktansseja on arvioitu R. Richterin kirjan (1930) mallin avulla Adept-ohjelman toimesta. Magnetointikone poikkeaa rakenteessaan kuitenkin huomattavan paljon tavallisesta tahtikoneesta, joten Adeptin analyttinen ratkaisu voi olla tässä kohdin puutteellinen.

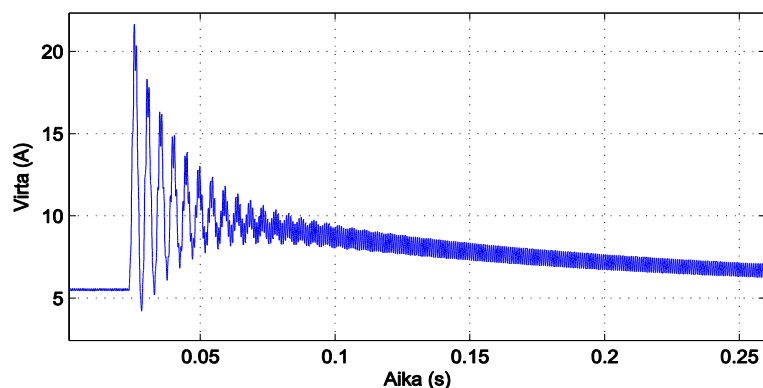
Erot simulaatiomallin ja mitatun koneen ilmväleissä voivat kasvattaa tai pienentää ilmvälin reluktanssia. Luvussa 5.3.2 esitetyn ilmvälimittauksen mukaan ilmväli saatiin aseteltua hyvin tasaiseksi, mutta se oli pituudeltaan noin 7 prosenttia simulaatiomallin arvoa lyhyempi.

Sysäysoikosulkuvirran yhtälön 17 mukaan reaktanssin kasvattaminen vaikuttaa roottorin vaihevirran arvoihin pienentävästi. Lisäämällä näin reaktanssia roottorin kääminpäihin taikka ulkoiseksi kuormaksi kuvastamaan tyristorisiltaa saadaan simuloitujen ja mitattujen vaihevirtojen alkuarvot vastaamaan paremmin toisiaan. Reaktanssin lisääminen kuitenkin laskee myös simulaation pysyvän tilan virtaa, mikä ei sovi yksiin mittauksien kanssa.

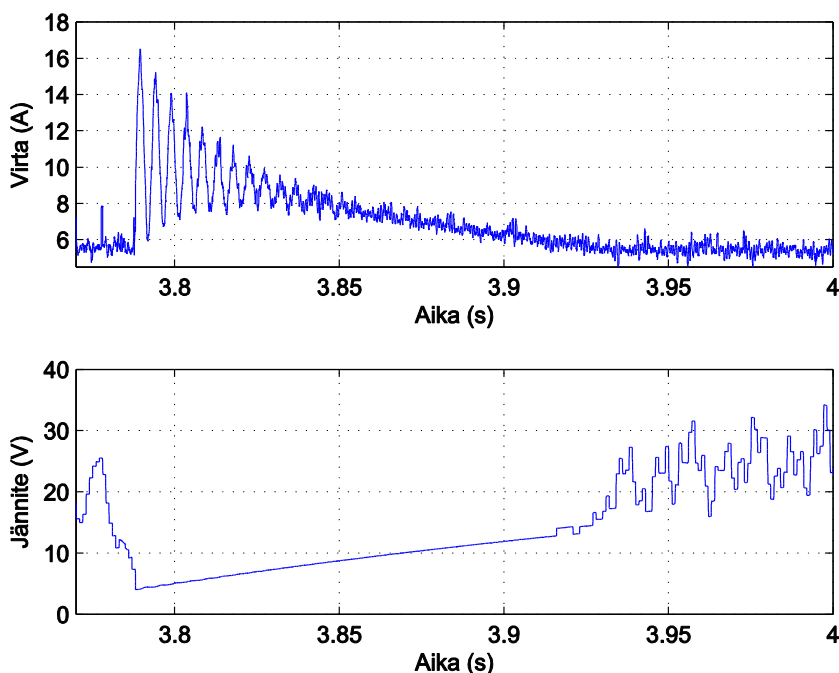
Kaavan 25 (Luomi 1998) mukaan lisäämällä koneen magnetointikäämityksen vastusta pienenee aikavakio  $\tau'_d$ . Simulaatiomallin magnetointikäämin vastusta jouduttiin lisäämään huomattavasti, noin 3-4 kertaa laskettua arvoa suuremmaksi, jotta saatu aikavakio  $\tau'_d$  vastasi mittauksista saatua arvoa. Tästä voidaan päätellä, että ero simuloitun ja mitatun roottorin vastuksissa ei selitä mittausten pientä  $\tau'_d$  arvoa.

$$\tau'_d = \left(1 - \frac{L_{df}^2}{L_d L_f}\right) \frac{L_f}{R_f} \quad (25)$$

Simulaatiomallissa ei ole huomioitu Unitrol 1000:n vaikutusta koneen toimintaan, joten jännitesäätäjän mahdollinen vaikutus muutostilassa olevaan magnetointikoneeseen kaipaa lisää tarkastelua. Magnetointikone magnetoitiin Unitrol 1000 jännitesäätäjällä, joka oli virtaohjaustilassa. Tarkastellaan magnetointikoneen staattorin jännitteen ja virran käyttäytymistä sysäysoikosulun aikana. Kuvassa 22 esitetään ensin simuloidun sysäysoikosulkukokeen magnetointivirta, jossa staattorin magnetointijännite pysyy koko kokeen ajan vakiona arvossa 38,63 voltia. Mittauksista saadut sysäysoikosulkukokeen jännite ja virta on esitetty kuvassa 23.



Kuva 22. Magnetointivirta simuloidun sysäysoikosulkukokeen aikana



Kuva 23. Mittauksista saatu magnetointivirta ja jännite sysäysoikosulkukokeen aikana

Kuvasta 23 nähdään, että magnetointikoneen jännite putoaa välittömästi sysäysoikosulun alussa ja nousee kohti alkuperäistä arvoa transienttitilan keston ajan. Magnetointikoneen virtasäädölle asetettu jännitesäätäjä aiheuttaa tilanteen, jossa jännitesäätäjä pyrkii ylläpitämään sille asetellun alkuperäisen magnetointivirran tason ja näin ollen pyrkii vaimentamaan magnetointivirtoja sysäysoikosulussa. Tämä on

mahdollinen syy kuvassa 21 esitettyyn mittauksista saatujen virtojen verhoikäyrän lineaariseen ja nopeasti vaimenevaan muotoon. Kuvasta 22 ja 23 voidaan nähdä, kuinka simuloitu magnetointivirta laskee selvästi mittausten dataa hitaammin kohti alkutilan arvoaan.

Tämän työn yhteydessä tehdyissä mittauksissa ei pystytty suorittamaan jännitteenheräämiskoeita koneen oikosulkuun ohjaamisessa käytetyn tyristorisillan takia. Mikäli koe olisi pystytty suorittamaan, on mahdollista, että määritetty parametri  $Td0'$  olisi ollut kestoltaan jännitteen vaimenemiskokeesta saatua vastaavaa parametria lyhyempi, kuten oikosulkuaikeavakion  $\tau_d'$  tapauksessa. Koska jännitteen heräämiskokeessa magnetointivirta putoaa muutostilan alussa, olisi virtaohjattu Unitrol 1000 pyrkinyt ohjaamaan magnetointivirran alkutilan arvoon nostamalla magnetointijännitettä ja näin ollen lyhentänyt muutostilan kestoa ja aikavakiota  $\tau_{d0}'$ .

Jännitteen heräämis- ja vaimenemiskokeita on suoritettu ABB:llä tahtigeneraattoreille ja mittauksissa on käynyt ilmi, että heräämiskokeesta määritetty aikavakio on ollut vaimenemiskokeesta määritettyä aikavakiota lyhyempi (Westerlund 2011). Jännitteen heräämis- sekä sysäys-oikosulkukokeiden mittauksissa on pääkoneen magnetointiin käytettyä magnetointikoneetta syötetty manuaalillassa virtaohjatulla Unitrol 1000 jännitesäätäjällä (Wendelin 2013). Magnetointikoneen syöttö toteutettiin tämän työn yhteydessä samalla tavalla. Tämä antaa syyn olettaa, että magnetoinnin syöttö on voinut vaikuttaa generaattoreille määritettyjen  $\tau_{d0}'$  ja  $\tau_d'$  aikavakioiden suuruuksiin ja aiheuttanut eroavaisuuksia eri menetelmillä määritettyjen tulosten välille.

Näiden arvioiden pätevyyttä voitaisiin tarkistaa suorittamalla kokeita tahtikoneelle, jossa magnetointi on toteutettu vakiojännitesyötöllä.

## 6.2 Kestomagneettinavan vaikutus parametreihin

Tässä työssä simulaatiot ja mittaukset suoritettiin magnetointikoneen staattorin kestopomagneettinavan ollessa pomagnetoituna sekä pomagnetoitamatta. Tällä haluttiin selvittää, kuinka suuri vaikutus kestopomagneettinavalla on koneen toimintaan. Intuitiivinen alkuoletus pomagnetoitamattoman kestopomagneettinavan vaikutuksesta parametreihin olisi noin 3 prosentin luokkaa, sillä kestopomagneettinava korvaa yhden kolmestakymmenestä neljästä umpiraumanavasta. Tässä luvussa vertaillaan koneen parametreja, jotka määritettiin kestopomagneettinavan ollessa eri tiloissa.

Taulukossa 24 on esitetty eri kokeilla määritetyt parametrit kolmessa eri tapauksessa:

1. Yhtä koneen staattorin navoista ei ole korvattu kestopomagneettinavalla. Geometria on täysin symmetrinen.
2. Yksi staattorin navoista on korvattu kestopomagneetilla, mutta kestopomagneetti on pomagnetoitamaton.
3. Yksi staattorin napa on korvattu kestopomagneetilla, joka on pomagnetoitu.

Taulukkoa 24 tarkastelemalla voidaan havaita, että pomagnetoidulla ja pomagnetoitamattomalla kestopomagneetilla tehtyjen kokeiden välillä parametreissa ei ole juuri lainkaan eroa. Verrattaessa näitä tuloksia simulaatioon, joka tehtiin symmetrisellä geometrialla, jossa ei ollut kestopomagneettinapaa, huomataan parametrien välillä



pieniä eroja. Aikavakiot kestopagneetitommassa simulaatiossa ovat noin 3-4 prosenttia pienempiä kuin kestopagneetitillisissa.

**Taulukko 24 Magnetointikoneen simuloitut parametrit kestopagneettinavan eri tiloissa**

Simuloitut parametrit	$X_d$ ( $\Omega$ )	$X'_d$ ( $\Omega$ )	$X''_d$ ( $\Omega$ )	$X''_q$ ( $\Omega$ )	$\tau'_{d0}$ (s)	$\tau'_d$ (s)	$\tau''_d$ (s)
<b>Ei kestopagneettiä:</b>							
I ja U vaimeneminen (IEC)	-	-	-	-	0,3623	0,1620	-
U herääminen (IEC)	-	0,5495	0,5436	-	0,3689	-	-
Sysäysoikosulku (IEC)	-	0,4917	0,3974	-	-	0,1659	0,0222
Käyräsovitus	1,0079	0,4754	0,3496	0,4042	-	0,1643	0,0284
<b>Kestopagneetti magnetoimatta:</b>							
I ja U vaimeneminen (IEC)	-	-	-	-	0,3730	0,1687	-
U herääminen (IEC)	-	0,5434	0,5369	-	0,3808	-	-
Sysäysoikosulku (IEC)	-	0,4880	0,3947	-	-	0,1744	0,0236
Käyräsovitus	0,9780	0,4967	0,3448	0,3982	-	0,1819	0,0364
<b>Kestopagneetti magnetoitu:</b>							
I ja U vaimeneminen (IEC)	-	-	-	-	0,3726	0,1702	-
U herääminen (IEC)	-	0,5471	0,5537	-	0,3800	-	-
Sysäysoikosulku (IEC)	-	0,4902	0,3969	-	-	0,1745	0,0230
Käyräsovitus	0,9882	0,4933	0,3501	0,4042	-	0,1790	0,0344

Mittauksista määritettiin parametrit vain magnetoidulle ja magnetoimattomalle kestopagneettinavalle, sillä kestopagneetitonta staattoria ei ollut mittauksia varten saatavilla. Sysäysoikosulkukokeiden mittausdatasta määritetyt aikavakiot poikkeavat huomattavasti simulaatioiden ja vaimenemiskokeiden aikavakioista. Jännitesäätäjän arvellaan vaikuttaneen luvun 6.1 mukaisesti sysäysoikosulkukokeista määritettyihin aikavakioihin ja näiden aikavakioiden tarkkuus on kyseenalainen. Tarkastellaan tässä vain mittaustuloksia, joihin jännitesäätäjä ei ole vaikuttanut, eli jännitteen ja virran vaimenemiskokeista saatuja aikavakioita. Taulukon 24 simulaatiotulosten perusteella kestopagneetin vaikutus parametreihin on hyvin pieni. Vaimenemiskokeiden mittauksista saadut aikavakiot on esitetty taulukossa 25.

**Taulukko 25 Mitatut aikavakiot kestopagneettinapa magnetoituna ja magnetoimatta**

Parametrit mittauksista	$\tau'_{d0}$ (s)	$\tau'_d$ (s)
Kestopagneetti magnetoimatta	0.3719	0.1851
Kestopagneetti magnetoitu	0.3703	0.1787

Taulukosta 25 nähdään, että magnetoimattomalla navalla aikavakiot näyttäisivät olevan hieman pidempiä kuin napa magnetoituna. Erot ovat kuitenkin varsin pieniä, etenkin tyhjäkäyntiaikavakion osalta. Oikosulkuaikavakiossa ero on selvempi. Magnetoimattomana oikosulkuaikavakio on kestoaltaan noin 3,5 prosenttia pidempi. Simulaatioissa ero ei ollut näin suuri.

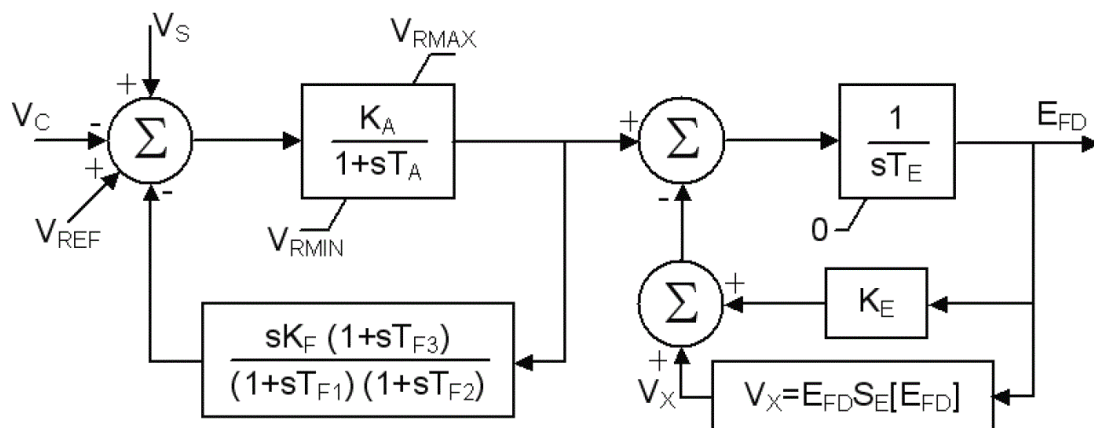
Jokainen taulukon 25 parametri on keskiarvo kolmesta toistetusta kokeesta. Taulukossa 14 ja 15 esitettyjen saman kokeen toistoista määritettyjen parametrien välillä näkyy varianssia, joka voi aiheuttaa epätarkkuutta taulukon 25 tuloksiin. Lisäämällä toistettujen kokeiden määrää olisi tulosten luotettavuus ja tarkkuus parempi.

### 6.3 Tulosten hyödyntäminen

Tämän työn tulosten perusteella voidaan ehdottaa parannuksia tehtäväksi analyttiseen laskuohjelmaan A045 tai mahdollista siirtymistä parametrien määrittämiseen FEM:n avulla. Analyttisen ohjelman antamat reaktanssiarvot vastaavat hyvin simuloituja ja mitattuja arvoja, mutta aikavakioiden laskua olisi tarkistettava.

Määritettäessä tahtikoneen aikavakioita ABB:n koekentällä on saaduissa  $\tau'_d$  ja  $\tau'_{d0}$  arvoissa ollut poikkeamia, kun niitä on määritetty eri kokeiden avulla (Westerlund 2011). Luvussa 6.1 arveltiin näiden erojen johtuvan tavasta, jolla koneita on magnetoitu. Parametrien määrittästä voisi koittaa siten, että magnetointikoneetta syötetään vakiojännitelähteellä.

A045 ohjelman tuloksia, erityisesti aikavakiota  $\tau'_{d0}$ , käytetään lisäksi tahtikoneiden magnetointijärjestelmien toiminnan simuloimisessa. Simulaatiot perustuvat IEEE standardin mukaisiin malleihin (IEEE Std 421.5.-2005 2006). Yhden tällaisen mallin mukainen lohkokkaavio on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Magnetointijärjestelmän AC5A mukainen lohkokkaavio.

Kuvassa 24 esiintyvä parametri  $T_E$  on tyhjäkäyntiaikavakio  $\tau'_{d0}$ . Tämän parametrin arvon korjaamista esitetään tämän työn tulosten perusteella. Tämän työn magnetointikoneella varustetussa magnetointijärjestelmässä tämä tarkoittaisi tyhjäkäyntiaikavakion muuttamista arvosta 0,1995 lähelle arvoa 0,37. Muutos on kokoluokaltaan merkittävä, sillä uusi arvo on analyttiseen arvoon nähden lähes kaksinkertainen. Tyhjäkäyntiaikavakio vaikuttaa myös suoraan magnetointijärjestelmän lohkokkaavion ulostuloon, joten arvon muuttaminen vaikuttaa merkittävästi ulostulorvoihin.

## 7 Johtopäätöksiä ja ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi

Työn tavoitteena oli mallintaa magnetointikoneen sähköisiä parametreja FEM:iä käyttäen, sekä tarkastella magnetointikoneen kestopagneettinavan vaikutuksia näihin parametreihin. Mallinnuksella saatujen tulosten mielekkyyttä haluttiin tarkastella vertaamalla niitä, sekä analyyttisellä laskentaohjelmalla, että mittauksilla saatuihin parametreihin.

FEM-simulaatioita varten luotiin magnetointikoneen poikkileikkausta kuvaavat geometriat, joiden avulla halutut kokeet simuloitiin FCSMEK-ohjelmaa käyttäen. Kaikista simuloituista kokeista määritettiin magnetointikoneen sähköisiä parametreja IEC standardin mukaisesti. Lisäksi sysäysoikosulkukokeista parametrit määritettiin myös käyräsovituksella.

Käytännön mittauksia varten saimme käyttöömmme magnetointikoneen, jonka mukaan simulaatiomalli toteutettiin. Saimme suoritettua magnetointikoneelle jännitteenheräämiskoetta lukuun ottamatta kaikki simulaatioilla tehdyt kokeet. Mittaustuloksista määritettiin koneen sähköiset parametrit kuten simulaatioiden yhteydessä.

Analyyttisestä laskentaohjelmasta, simulaatioista ja mittauksista saadut reaktanssiparametrit vastasivat toisiaan pääosin hyvällä tarkkuudella. Poikkeama esiintyi alkutilareaktanssin  $X_d''$  arvoissa simuloitujen sysäysoikosulkukokeiden ja muilla tavoilla määritettyjen  $X_d''$  arvojen välillä.

Simulaatioilla ja mittauksilla määritetyt aikavakiot vastasivat toisiaan hyvällä tarkkuudella yhtä poikkeavaisuutta lukuun ottamatta. Sysäysoikosulkukokeen mittauksista määritetty oikosulkuaikavakio  $\tau_d'$  poikkesi selvästi muista simuloituista tai mitatuista  $\tau_d'$  arvoista. Tämän arveltiin johtuvan koelaitteiston magnetoinnissa käytetystä Unitrol 1000 jännitesäätäjästä, jota ohjattiin kokeita tehtäessä virtasäädöllä.

ABB Oy:n koekentällä on määritetty aikavakioita tahtikoneille käyttäen vastaavaa magnetointia kuin tässä työssä. Näin saaduissa aikavakioissa on esiintynyt myös poikkeavaisuuksia eri kokeiden välillä.

Mitatut ja simuloidut aikavakiot poikkesivat merkittävästi analyyttisen laskentaohjelman antamista aikavakioista  $\tau_d'$  ja  $\tau_{d0}'$ . Analyyttiset aikavakiot olivat suuruudeltaan lähes puolet simuloituja ja mitattuja lyhyempiä.

Aikavakioita on käytetty muun muassa magnetointijärjestelmien toiminnan simuloinnissa. Tähän asti simuloinnissa käytetyt aikavakiot on saatu analyyttisestä laskentaohjelmasta. Tämän työn tulosten perusteella näissä simulaatioissa käytettyjä aikavakioita tulisi tarkistaa.

Magnetointikoneen kestopagneettinavan vaikutusta parametreihin tutkittiin suorittamalla simulaatiot ja mittaukset kestopagneetti magnetoidussa ja magnetoimattomassa tilassa. Saatujen tulosten perusteella voidaan kestopagneettinavan vaikutusta koneen toimintaan pitää pienenä. Tämä mahdollistaa magnetointikoneen simuloinnin symmetrisellä kestopagneetittomalla sektorigeometrialla sen aiheuttamatta suurta virhettä saatuihin parametreihin.

Sektorigeometrialla toteutettu simulointi on ajallisesti huomattavasti täyttä geometriaa nopeampaa, mikä parantaa FEM:n käyttökelpoisuutta analyyttisen laskentaohjelman vaihtoehtoksi päivittäisessä laskennassa.

Tämän työn tulosten perusteella ehdotetaan seuraavaa:

- Magnetointikoneiden analyyttisen laskentaohjelman aikavakioiden  $\tau_d'$  ja  $\tau_{d0}'$  laskenta tulisi tarkistaa ja tarvittaessa korjata tai vaihtoehtoisesti siirtyä parametrien määrittämiseen FEM:llä.
- Mitattaessa aikavakioita voitaisiin magnetointikoneen syöttö toteuttaa virtasäädön sijaan vakiojännitteellä ja tarkastella vastaavatko eri kokeilla määritetyt aikavakiot paremmin toisiaan.

## Viitteet

- Arkkio, A. 1987. Analysis of Induction Motors Based on the Numerical Solution of the Magnetic Field and Circuit Equations. Helsinki. 97 s. (Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No. 59). ISBN 951-666-250-1. ISSN 0001-6845. URL <http://lib.tkk.fi/Diss/198X/isbn951226076X/>
- Arkkio, A. 2001. FCSMEK, PART C, REFERENCE MANUAL. Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan laboratorio. Versio 3.1. 68 s.
- IEC 60034-4. 2008. Rotating electrical machines – Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests. Versio 3.0. Geneve, Sveitsi: IEC. 158 s.
- IEEE Std 421.5-2005. 2006. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 95 s.
- Luomi, J. 1993. Finite element methods for electrical machines. Göteborg, Chalmers University of Technology, Department of Electrical Machines and Power Electronics. Opetusmoniste. 143 s.
- Luomi, J. 1998. Transient Phenomena in Electrical Machines. Göteborg, Chalmers University of Technology. Department of Electric Power Engineering. Opetusmoniste. 89 s.
- Luomi, J. & Niiranen, J. & Niemenmaa, A. 2007. Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt, Osa 2. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Tehoelektroniikan laboratorio ja Sähkömekaniikan laboratorio. Opetusmoniste. 146 s.
- Meeker, D. 2009. Finite Element Method Magnetics. Versio 4.2. Käyttöohje. 158 s. URL <http://www.femm.info>
- Mäkelä, O. 2009. Parameter estimation for synchronous machine models. Licensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo. 76 s.
- Niemelä, E. 2005. Magnetointikoneen suunnittelun automatisointi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Espoo. 50 s.
- Pyrhönen, J. & Jokinen, T. & Hrabovcová, V. 2008. Design of Rotating Electrical Machines. Niemelä, H. (käännös). Chichester, West Sussex, Iso-Britannia: John Wiley & Sons Ltd. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6.
- Pärssinen, K. 2005. Sysäysoikosulkukoe. ABB Oy, Helsinki. Sisäinen työohje.
- Rasilo, P. Low-voltage Synchronous Generator Excitation Optimization and Design. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Espoo. 69 s.
- Richter, R. 1930. Elektrische Maschinen 2, Synchronmaschinen und Einankerumformer. Berlin, Julius Springer. 707 s.

Ryyppö, T. 2012. FCSMEK in Daily Use. ABB Oy, Motors and Generators, Technology Center. Sisäinen dokumentti. 153 s.

Silander, E. 2001. Standardiratkaisujen käyttö tahtikoneiden valmistuksessa. Helsinki, ABB Oy. Sisäinen dokumentti. 20 s.

Wendelin, T. 2005. Jännitteen herääminen. ABB Oy, Helsinki. Sisäinen työohje.

Wendelin, T. 2013. Koestusinsinööri. Abb Oy. Helsinki, PL 186, 00381. Haastattelu 12.4.2013.

Westerlund, J. 2011. Time constant calculation improvement. ABB Oy, Helsinki. Tutkimusraportti. 5 s.

## Liite A

Mittausten yhteydessä tehtiin kaksi ylimääräistä sysäysoikosulkukoetta. Ensimmäinen sysäysoikosulku tehtiin demagnetoidulle koneelle puolella nimellisjännitteellä. Tällä haluttiin varmistaa, että kone ei käyttäydy oikosulkukokeen aikana odottamattomalla tavalla. Saadulle datalle tehtiin käyräsovitukset kuten muillekin kokeille. Sovituksen avulla määritetyt parametrit esitetään taulukossa A1.

**Taulukko A1. Alennetulla jännitteellä tehdystä sysäysoikosulkukokeesta määritetyt parametrit**

	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X''_q(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,7391	0,3353	0,2968	0,3668	0,1572	0,0112
$I_b$	0,7892	0,3563	0,1918	0,2082	0,1531	0,0134
$I_c$	0,7799	0,3562	0,5026	0,1929	0,1539	0,0005
Keskiarvo	0,7694	0,3493	0,3304	0,2560	0,1547	0,0084
p.u.	1,1748	0,5333	0,5045	0,3908		

Kokeiden lopuksi tehtiin lisäksi sysäysoikosulkukoe ylijännitteellä. Tällä haluttiin tutkia mahdollisia saturoitumisen vaikutuksia parametreihin. Saadut parametrit esitetään taulukossa A2.

**Taulukko A2. Puolitoistakertaisella nimellisjännitteellä tehdystä sysäysoikosulkukokeesta määritetyt parametrit**

	$X_d(\Omega)$	$X'_d(\Omega)$	$X''_d(\Omega)$	$X''_q(\Omega)$	$\tau'_d(s)$	$\tau_a(s)$
$I_a$	0,6347	0,3151	0,3381	0,3488	0,0979	0,0164
$I_b$	0,6797	0,3319	0,2523	0,2619	0,0943	0,0187
$I_c$	0,6676	0,3156	1,1381	2,6802	0,0844	0,0123
Keskiarvo	0,6572	0,3235	0,2952	0,3054	0,0961	0,0176
p.u.	1,0035	0,4940	0,4508	0,4663		

Ylijännitekokeella tehdyn sysäysoikosulkukokeen datalle tehty käyräsovitukset epäonnistui taulukossa A2 esitetyn vaiheen  $I_c$  osalta ja siitä syystä taulukossa A2 laskettuihin  $X''_d$  ja  $X''_q$  keskiarvoihin ei ole sisällytetty vaiheen  $I_c$  arvoja. Tästä johtuen A2 taulukosta määritetyt  $X''_d$  ja  $X''_q$  parametrit ovat luultavasti vääristyneet.